

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2025-15-2-28-36>

Программное обеспечение для анализа движений захвата и переноса рукой: возможности применения в когнитивных и нейрофизиологических исследованиях

А.О. Вязьмин¹, М.Р. Чапанова², М.С. Морозов², С.А. Аксенов², М. Феурра¹¹Центр нейроэкономики и когнитивных исследований, Институт когнитивных нейронаук ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; Россия, 101000 Москва, ул. Мясницкая, 20;²Департамент прикладной математики Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; Россия, 123458 Москва, Таллинская ул., 34**Контакты:** Александр Олегович Вязьмин aovyzmin@hse.ru

Цель исследования – представить программное обеспечение Kinematic 4, предназначенное для автоматизированного анализа кинематических характеристик действий захвата и переноса объектов рукой на основе данных, полученных с помощью систем захвата движения.

Материалы и методы. Программа разработана на языке Python и реализует алгоритмы автоматического определения ключевых временных точек двигательного акта. Исходная алгоритмическая структура была апробирована ранее в среде MATLAB и адаптирована в виде кроссплатформенного настольного приложения с графическим интерфейсом. Kinematic 4 позволяет анализировать координатные данные, полученные от трекеров, размещенных на пальцах, запястье, объекте и специализированных очках с подвижной створкой. Программа определяет 6 временных маркеров, соответствующих этапам выполнения действия: начало эксперимента, начало движения кисти, начало раскрытия пальцев, максимальную апертуру захвата, начало подъема объекта и его опускание.

Результаты. Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью Kinematic 4 и ранее разработанного MATLAB-скрипта, показал полное соответствие. Программа успешно прошла верификацию на экспериментальных данных и продемонстрировала стабильную работу. Благодаря интуитивно понятному интерфейсу и автоматизации расчетов Kinematic 4 обеспечивает воспроизводимый и удобный инструмент для научных и клинических исследований.

Выводы. Программное обеспечение может быть эффективно использовано для оценки движений руки в нейронаучных и клинических задачах, включая диагностику моторных нарушений и мониторинг восстановительных процессов. В перспективе возможны интеграция с другими биофизическими сигналами и внедрение элементов интеллектуального анализа данных.

Ключевые слова: кинематический анализ, система захвата движения, моторное планирование, реабилитация, нейродиагностика, Python

Для цитирования: Вязьмин А.О., Чапанова М.Р., Морозов М.С. и др. Программное обеспечение для анализа движений захвата и переноса рукой: возможности применения в когнитивных и нейрофизиологических исследованиях. Нервно-мышечные болезни 2025;15(2):28–36.

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2025-15-2-28-36>

Software for the analysis of reach-to-grasp and transport movements: applications in cognitive and neurophysiological research

A.O. Vyazmin¹, M.R. Chapanova², M.S. Morozov², S.A. Aksenov², M. Feurra¹¹Centre for Cognition and Decision making, Institute for Cognitive Neuroscience, National Research University “Higher School of Economics”; 20 Myasnienskaya St., Moscow 101000, Russia;²School of Applied Mathematics, Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University “Higher School of Economics”; 34 Tallinskaya St., Moscow 123458, Russia**Contacts:** Aleksandr Olegovich Vyazmin aovyzmin@hse.ru

Aim. To present Kinematic 4, a software tool designed for automated analysis of reach-to-grasp and object transport movements using data obtained from motion capture systems.

Materials and methods. The software was developed in Python and implements algorithms for automatic detection of key temporal events in motor actions. Initially validated in MATLAB, the algorithmic framework was adapted into a cross-platform desktop application with a graphical user interface. Kinematic 4 processes coordinate data from markers placed on the thumb, index finger, wrist, object, and specialized glasses with a movable shutter. The program identifies six critical time points: experiment onset, hand lifting, finger opening, maximum grasp aperture, object lifting, and object placement.

Results. Comparison between results obtained using Kinematic 4 and those generated by the original MATLAB script demonstrated full consistency. The software was successfully validated on experimental datasets and showed high stability. Its user-friendly interface and automated workflow make it a reliable and reproducible tool for both research and clinical applications.

Conclusion. Kinematic 4 can be effectively used for assessing upper-limb movements in neuroscience and clinical contexts, including the diagnosis of motor impairments and monitoring of recovery dynamics. Future development may include integration with other biosignals and machine learning modules for predictive analytics.

Keywords: kinematic analysis, motion capture, motor planning, rehabilitation, neurodiagnostics, Python

For citation: Vyazmin A.O., Chapanova M.R., Morozov M.S. et al. Software for the analysis of reach-to-grasp and transport movements: applications in cognitive and neurophysiological research. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular Diseases* 2025;15(2):28–36. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2025-15-2-28-36>

Введение

Точные и скоординированные движения руки, включая захват и перемещение объектов, являются ключевыми для повседневной активности человека и лежат в основе его взаимодействия с окружающей средой [1]. Кинематика хватательных движений на протяжении десятилетий остается предметом пристального внимания исследователей в области нейронаук, моторного контроля и биомеханики [2, 3]. Нарушения подобных движений часто наблюдаются при поражениях центральной и периферической нервной системы, включая инсульт, болезнь Паркинсона и другие неврологические заболевания [4–6].

Для объективной оценки степени моторного дефицита, динамики восстановления и эффективности реабилитационных вмешательств необходимы инструменты, позволяющие детализированно анализировать структуру движений. Одним из наиболее информативных методов является трехмерный кинематический анализ, основанный на регистрации координат движущихся сегментов тела с высокой временной и пространственной разрешающей способностью с использованием систем захвата движения [7–9]. Однако внедрению этого подхода в рутинную клиническую и исследовательскую практику препятствуют трудоемкость обработки, необходимость ручной разметки фаз движения и ограниченная доступность программных решений, способных обеспечить автоматизированный анализ данных.

В большинстве работ, посвященных изучению движений захвата рукой, внимание сосредотачивается преимущественно на фазе приближения руки к объекту и непосредственно на акте захвата [2, 10]. Однако в последнее время наблюдается рост числа исследова-

ний, в которых анализ охватывает также фазу переноса захваченного объекта. Это расширение позволяет получить более полное представление о координации и организации всего двигательного акта. Исследование полной последовательности хватания рукой — от начала движения до финального размещения объекта — создает условия для оценки как дистальных, так и проксимальных компонентов моторики, а также более точно отражает особенности сенсомоторной интеграции в приближенных к реальной жизни сценариях.

Так, в работе T. Sziburi и соавт. представлен каталог трехмерных траекторий переноса объектов, основанный на движениях здоровых участников, что позволяет систематически анализировать пространственные характеристики транспортной фазы и их зависимость от направления и цели движения [11]. В другом исследовании показано, что такие факторы, как масса объекта и доминирующая рука, влияют не только на параметры захвата, но и на последующее перемещение предмета (бутылочек с водой различной массы), что было продемонстрировано на выборке детей в возрасте 8–11 лет [12]. Эти результаты подчеркивают функциональную взаимосвязь между фазами захвата и переноса, а также необходимость учитывать внешние условия задачи при интерпретации моторных паттернов.

У пациентов с неврологическими нарушениями фаза переноса может быть даже более чувствительной к патологическим изменениям, чем акт захвата. В частности, исследование H. Choi и соавт. с участием пациентов, перенесших инсульт, выявило выраженные нарушения на этапе транспортировки: значительное увеличение времени выполнения движения, компенсаторные стратегии туловища и плечевого пояса, а также снижение плавности и точности траектории [13].

Сходные выводы были получены и в работе М.А. Murphy и соавт., где с помощью кинематического анализа изучалась задача «взять стакан, сделать глоток и поставить обратно» у пациентов после инсульта. Наиболее чувствительными метриками, различающими пациентов с легкими и умеренными двигательными нарушениями, оказались параметры, описывающие фазу переноса, такие как общее время движения, количество единиц движения и пиковая угловая скорость в локтевом суставе. Авторы подчеркивают, что именно анализ полной последовательности действия, включая транспортную фазу, позволяет объективно охарактеризовать качество двигательной функции и выделить клинически значимые отличия [14].

Совокупность этих данных подчеркивает, что анализ переноса объекта является неотъемлемым компонентом исследования двигательной активности, обладающим высокой диагностической значимостью. Его включение в оценочные протоколы позволяет более глубоко понять особенности моторного планирования, контроля и адаптации как в норме, так и при различных формах неврологической патологии.

В настоящей работе представлен программный комплекс Kinematic 4, разработанный на языке Python и предназначенный для автоматизированного анализа кинематических данных, получаемых с использованием систем захвата движения. Программа ориентирована на задачи, включающие захват объекта 2 пальцами (указательным и большим) с последующим его перемещением и размещением в заданной зоне. Алгоритмы Kinematic 4 обеспечивают автоматическое определение ключевых временных точек, отражающих этапы выполнения действия: момент начала эксперимента (например, открытие специальных очков), начало движения руки, начало раскрытия пальцев, момент максимального расстояния между большим и указательным пальцами, момент начала подъема объекта, а также момент его опускания и установки в целевое положение. Выделение подобных временных точек широко используется в нейронаучных и клинических исследованиях для анализа различных фаз движения, связанных с захватом и перемещением объектов рукой [2, 3, 7, 10, 14].

Изначально Kinematic 4 был создан для анализа данных в эксперименте, направленном на исследование влияния пространственной ориентации объекта на моторное планирование [15]. Однако функциональность программы не ограничивается данным протоколом. Программный комплекс может быть применен в любом эксперименте с использованием системы захвата движения, предусматривающем действия по захвату и переносу объектов, при условии размещения маркеров на пальцах, запястье и самом объекте.

Определение ключевых временных точек в структуре двигательного действия позволяет разделить его на фазы, различающиеся по степени вовлеченности

центральных и периферических механизмов управления движением. Начальная фаза, связанная с инициацией или подготовкой движения, преимущественно отражает когнитивные и премоторные процессы, опосредованные центральной нервной системой [3, 16]. Напротив, фаза выполнения — т. е. перемещение объекта в пространстве — зависит от согласованной работы как центральных, так и периферических компонентов: двигательных путей, периферических нервов и сенсорной обратной связи [17, 18].

Таким образом, поэтапный анализ движения с точной временной маркировкой позволяет не только реконструировать его структурную организацию, но и дифференцировать вклад различных отделов нервной системы на каждом этапе выполнения. Это представляет особую ценность для клинической диагностики и оценки неврологических нарушений, поскольку дает возможность выявлять локальные или системные дефициты моторного контроля. В этом отношении программа Kinematic 4, обеспечивающая автоматическое определение ключевых временных точек движения, может быть эффективно использована как в фундаментальных нейронаучных исследованиях, так и в клинической практике — для объективной оценки, мониторинга динамики восстановления и уточнения характера моторных нарушений у пациентов с поражением центральной нервной системы.

Цель исследования — представить программное обеспечение Kinematic 4, предназначенное для автоматизированного анализа кинематических характеристик действий захвата и переноса объектов рукой на основе данных, полученных с помощью систем захвата движения.

Материалы и методы

Алгоритмическая основа программного обеспечения Kinematic 4 была разработана в ходе нейронаучного исследования, посвященного анализу движений захвата и переноса объектов рукой [15]. Первоначально обработка данных осуществлялась с помощью MATLAB-скрипта, реализующего автоматическое выделение ключевых временных точек. На следующем этапе, в сотрудничестве с инженерной командой Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», был создан полнофункциональный программный продукт на языке Python с графическим интерфейсом, поддержкой визуализации, экспорта и автоматической обработки координатных данных (рис. 1). При этом была сохранена математическая идентичность алгоритмов, что обеспечило воспроизводимость результатов.

Программное обеспечение Kinematic 4 предназначено для анализа экспериментальных данных, полученных при выполнении участником действия, включающего захват объекта рукой и его последующий

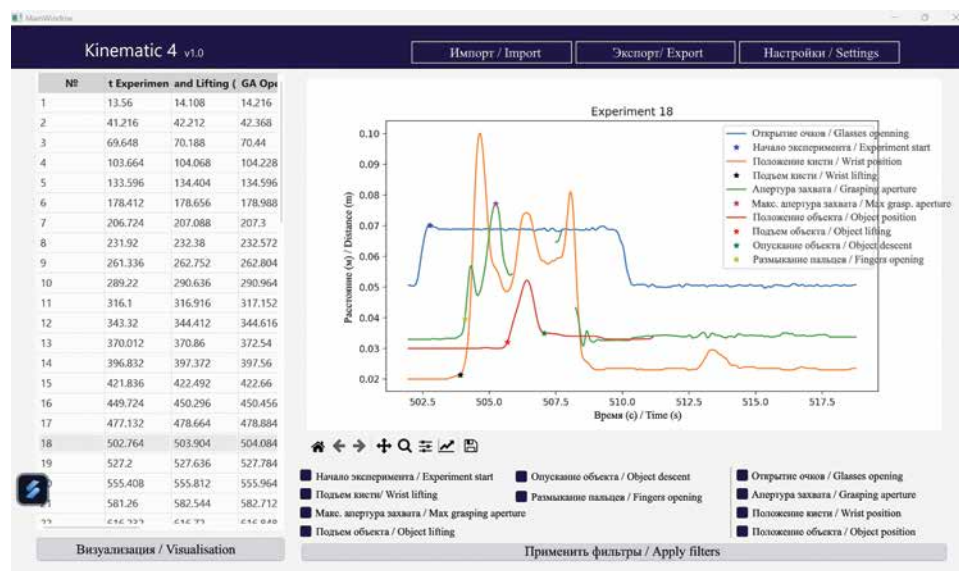


Рис. 1. Интерфейс программного обеспечения Kinematic 4

Fig. 1. Kinematic 4 software interface

перенос. Для использования программы необходимо предварительно провести запись движения с помощью оптической системы захвата движения. Дополнительно в эксперименте применяются специальные очки с поднимающейся фронтальной створкой, которые позволяют точно определить момент, когда испытуемый начинает визуально воспринимать задачу. Конструкция и принципы работы этих очков подробно описаны в нашей предыдущей публикации [15].

Программное обеспечение Kinematic 4 обрабатывает координатную информацию, полученную от 7 трекеров, размещенных в следующих анатомических и функциональных точках:

- центр ногтевой пластины большого пальца правой руки (трекер Thumb);
- центр ногтевой пластины указательного пальца правой руки (трекер Index);
- шиловидный отросток лучевой кости (трекер Inside);
- шиловидный отросток локтевой кости (трекер Outside);
- поверхность анализируемого объекта (трекер Object);
- дужка специальных очков (трекер Frame);
- поднимающаяся фронтальная часть очков (трекер Glasses).

Каждый из трекеров должен быть четко распознан системой захвата движения, поскольку программа рассчитывает движение и временные события на основе координатных данных всех указанных точек.

Программа включает 5 основных функциональных блоков:

1. Импорт координатных данных, полученных с систем захвата движения. Программное обеспечение

Kinematic 4 осуществляет импорт данных из файлов, сохраненных в формате .mat, без необходимости использования среды MATLAB. Загрузка осуществляется непосредственно из интерфейса Kinematic 4. Для корректной работы программы структура файла должна соответствовать определенным требованиям. В частности, файл должен содержать переменные с данными, полученными от каждого трекера: Frame, Glasses, Index, Thumb, Inside, Outside, Object. Каждая переменная представляет собой таблицу, включающую 5 столбцов. Первый столбец отражает номер кадра, зарегистрированного системой захвата движения. Второй столбец содержит информацию о временной метке соответствующего кадра (при частоте записи 250 Гц значение рассчитывается как деление номера кадра на 250). Третий, четвертый и пятый столбцы соответствуют координатам (x, y, z) конкретного трекера. Наличие всех указанных переменных и их стандартизированная структура являются обязательным условием для автоматизированной обработки данных в Kinematic 4.

2. Настройка параметров расчета временных точек.

В составе функционального блока параметров программы Kinematic 4 предусмотрена возможность настраивать величины, позволяющие адаптировать алгоритмы автоматического анализа под характеристики экспериментальных данных и цели исследования (рис. 2). Один из ключевых параметров, «расстояние между пиками», регулирует минимальный интервал между последовательно определяемыми моментами начала экспериментальных попыток. Этот параметр используется для исключения ложных срабатываний, возникающих вследствие шумов или колебаний сигнала, особенно при анализе длительных или нестабильных записей. Увеличение значения позволяет строже филь-

Kinematic 4 v1.0

Расстояние между пиками: Distance between peaks	410
Пороговое значение скорости поднятия руки: Threshold value of wrist lifting velocity	0.005
Пороговое значение открытия пальца: Threshold value of fingers opening	1.2
Пороговое значение скорости подъема предмета: Threshold value of object lifting velocity	0.01
Пороговое значение скорости опускания предмета: Threshold value of object descent velocity	0.005
Максимальное значение Frame-Glasses: Maximal value of Frame-Glasses	0.07
Минимальное значение Frame-Glasses: Minimal value of Frame-Glasses	0.051

Обновить отчет / Update report

Вернуть значения по умолчанию / Reset to default

Рис. 2. Настройка параметров расчета временных точек в программном обеспечении Kinematic 4

Fig. 2. Setting up parameters for calculating time points in the Kinematic 4 software

тровать временные точки, игнорируя близко расположенные к предыдущему событию кандидаты, что снижает вероятность ошибочной детекции. Напротив, уменьшение интервала делает алгоритм более чувствительным к повторяющимся попыткам, что актуально при анализе коротких или часто повторяющихся действий.

Следующий параметр, «пороговое значение скорости подъема кисти», определяет чувствительность алгоритма к вертикальному ускорению запястья. Он служит критерием для фиксации момента начала движения руки. Более высокие значения параметра позволяют регистрировать только резкие и выраженные движения, что предпочтительно при работе с четкими моторными актами у здоровых участников. В то же время снижение порога позволяет учитывать слабые или замедленные подъемы кисти, характерные, например, для пациентов с нарушениями двигательной функции. Однако чрезмерное понижение этого порога может привести к ложным срабатываниям, обусловленным микродвижениями или колебаниями сигнала.

Отдельное значение имеет пороговое значение раскрытия пальцев, которое используется для автоматического определения момента начала разведения большого и указательного пальцев. Этот параметр отражает чувствительность алгоритма к увеличению апертуры и может быть адаптирован под характер моторного поведения. При высоком пороге фиксируются только явно выраженные жесты раскрытия, что важно при исследовании динамичных и уверенных движений. Напротив, пониженные значения обеспечивают распоз-

навание малых и плавных изменений апертуры, что может быть полезно при исследовании двигательной патологии. Корректный выбор этого параметра позволяет надежно выделять начальную фазу подготовки к захвату, сохраняя при этом устойчивость алгоритма к фоновым колебаниям.

Параметр «пороговое значение скорости подъема объекта» определяет чувствительность алгоритма к началу вертикального перемещения предмета. Он используется для автоматического выделения момента, когда объект, захваченный рукой, начинает подъем. Этот момент регистрируется на основании превышения порогового значения скорости по вертикальной оси. Повышение порогового значения позволяет учитывать только движения с выраженным ускорением, тем самым исключая случайные колебания или шумовые артефакты. Это особенно важно при анализе данных, содержащих посторонние движения руки или нестабильность системы отслеживания. Напротив, снижение значения делает алгоритм более чувствительным к плавным и медленным подъемам объекта, что может быть полезно при работе с ослабленными или замедленными движениями, например у пациентов с моторными нарушениями. Однако при чрезмерно низком пороге возрастает вероятность ложных срабатываний, обусловленных незначительными колебаниями объекта в покое.

Параметр «пороговое значение скорости опускания объекта» используется для автоматического определения момента завершения перемещения и опускания предмета в целевую зону. Фиксация данного события основана на снижении вертикальной скорости движения объекта ниже заданного порога, что отражает переход от активного транспортного компонента к его завершению. Увеличение порогового значения позволяет фиксировать момент опускания на более ранней стадии замедления, что может быть уместно при анализе быстрых и четко структурированных движений. В то же время чрезмерно высокое значение может привести к пропуску события, особенно в случаях, когда опускание осуществляется плавно. Снижение значения параметра повышает чувствительность алгоритма к замедлению объекта, позволяя точно определить завершение действия даже при низкой скорости. Однако при слишком низком пороге возрастает риск регистрации артефактных точек, вызванных микродвижениями или фоновыми колебаниями объекта в неподвижном положении.

Параметры минимального и максимального расстояния между треками Frame и Glasses используются для валидации открытия очков — ключевого события, обозначающего начало экспериментального действия. Эти треки закрепляются на подвижной и неподвижной частях очков соответственно, и расстояние между ними изменяется при открытии створки. Программное обеспечение отслеживает динамику

этого расстояния и регистрирует событие начала эксперимента только в том случае, если изменение попадает в заданный диапазон. Данные параметры необходимы для корректной работы алгоритма при использовании разных моделей очков, имеющих иные конструктивные размеры. Значения по умолчанию подобраны для очков, применявшихся в исходной экспериментальной установке, и при их замене рекомендуется производить повторную калибровку. Настройка этих порогов обеспечивает устойчивость алгоритма к колебаниям сигнала и позволяет избежать ложной детекции начала эксперимента при случайных движениях или неполном открытии створки очков.

3. Автоматическое определение ключевых временных событий. Программа Kinematic 4 осуществляет автоматическую идентификацию 6 ключевых временных точек, отражающих этапы выполнения двигательного действия. К ним относятся:

- начало эксперимента (фиксируется по изменению расстояния между частями очков);
- начало движения руки (момент отрыва запястья от исходного положения);
- начало раскрытия пальцев;
- момент максимальной апертуры захвата;
- начало подъема объекта;
- момент опускания объекта.

Каждое из этих событий определяется на основе расчета производных по скорости или изменению пространственных показателей определенных треков. Использ-

зуемые алгоритмы учитывают не только абсолютные значения координат, но и их динамику, а также характерные закономерности двигательного паттерна. Данные маркеры автоматически привязываются к временной шкале и сохраняются для последующего анализа.

4. Визуализация данных. Интерфейс программы Kinematic 4 включает функциональный блок визуализации, в котором в виде графиков представлены ключевые параметры, используемые для автоматического определения временных событий (рис. 3). Графическое отображение реализовано на временной шкале, где каждая линия соответствует определенной пространственной характеристике, полученной на основе координат треков. На графике отображаются:

- расстояние между треками на очках (движимой и неподвижной частях), которое используется для выявления момента открытия очков и, соответственно, начала эксперимента;
- траектория движения запястья по вертикальной оси, позволяющая определить момент начала активного движения руки вверх;
- график апертуры захвата (расстояние между большим и указательным пальцами), который применяется для фиксации момента начала раскрытия пальцев и нахождения максимального значения апертуры;
- вертикальная траектория движения объекта, используемая для автоматического выявления момента его подъема и последующего опускания.

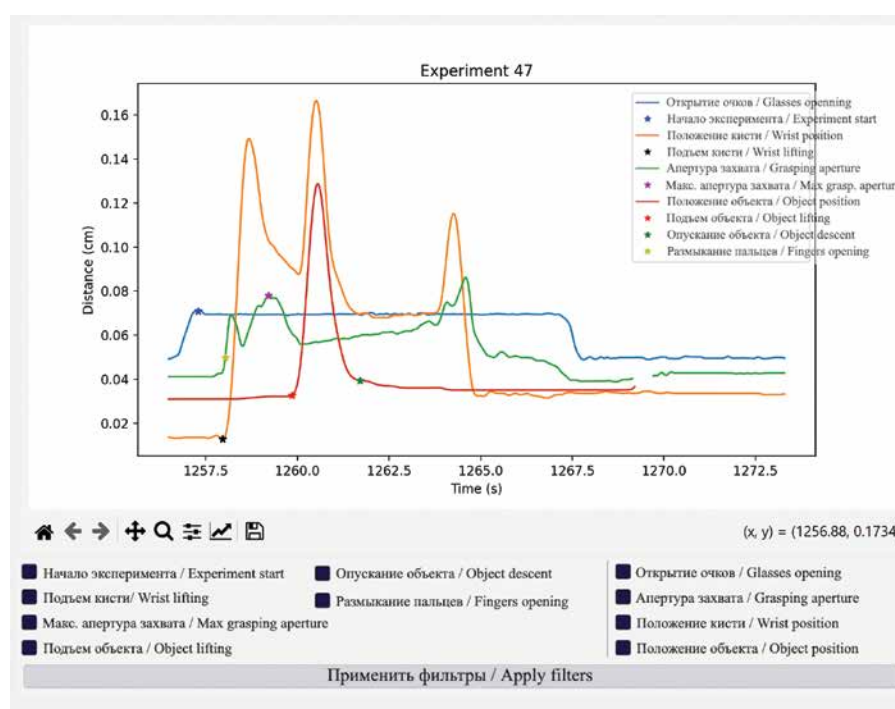


Рис. 3. Визуализация данных в программном обеспечении Kinematic 4

Fig. 3. Data visualization in Kinematic 4 software

Ключевые временные точки, определенные алгоритмом, отображаются на графике с помощью цветных маркеров, обозначающих соответствующие события. Такая визуализация позволяет пользователю быстро оценить точность и корректность распознавания фаз движения, а при необходимости — вручную скорректировать настройки анализа. Интерфейс предусматривает возможность масштабирования, навигации по оси времени и сохранения изображения в графическом формате.

5. Экспорт результатов в формате .xlsx для последующего анализа. Для формирования финального экспортного файла программа Kinematic 4 требует дополнительной загрузки вспомогательного файла в формате .xlsx, содержащего описание структуры эксперимента, в частности последовательность предъявления стимулов или условий (например, информацию о типе объекта, используемом в каждой попытке). Это позволяет объединить автоматически рассчитанные временные параметры с метаинформацией о содержании экспериментальных проб. После выполнения анализа и загрузки описательного файла программа формирует итоговую таблицу, в которой каждая строка соответствует отдельной попытке. В таблице представлены:

- значения ключевых временных точек (в секундах);
- идентификаторы событий (например, начало эксперимента, подъем кисти, момент захвата и т. д.);
- сопоставленная информация из экспериментального плана (тип объекта, его ориентация, серия и пр.).

Финальный файл сохраняется в формате .xlsx и может быть использован для статистической обработки данных, последующего анализа в сторонних программах (SPSS, R, Python) или интеграции в базы данных. Такой подход обеспечивает целостность, воспроизводимость и удобство структурирования данных при работе с сериями моторных экспериментов.

Результаты

Для верификации корректности работы разработанного программного обеспечения Kinematic 4 мы провели сравнительный анализ его результатов с данными, полученными ранее с использованием нашего алгоритма на базе MATLAB. Оба инструмента использовали идентичные алгоритмические принципы для автоматического выделения ключевых временных точек двигательного действия, что обеспечивало возможность прямого сопоставления выходных данных. Сравнение проводилось на выборке экспериментальных данных, полученных в рамках предыдущего исследования [15]. Основным методом сравнения результатов стало вычисление модуля разности между расчетными значениями, полученными с помощью 2 программ: MATLAB, используемой в лаборатории, и собственной разработанной программы. Для каждого параметра проводилось отдельное вычисление отклонений.

Как показали результаты, среднее расхождение между вычислениями по ключевым фиксируемыми ал-

горитмами стартовым параметрам составило всего 0,03 %. Этот показатель демонстрирует практически идеальное совпадение между результатами 2 программ, что свидетельствует о высоком уровне точности и надежности разработанного программного обеспечения. В большинстве случаев расхождения находились в пределах статистической погрешности, что подтверждает правильность алгоритмов и корректность расчетов. Разработанная программа обеспечивает результаты, практически идентичные данным, полученным с использованием стандартных лабораторных инструментов.

Таким образом, Kinematic 4 позволяет воспроизводить ранее верифицированные алгоритмы анализа кинематических данных с эквивалентной точностью при значительно большей удобстве и доступности пользовательского интерфейса. Полученные результаты подтверждают, что разработанный программный комплекс может рассматриваться как надежный, воспроизводимый и функционально завершенный инструмент для научных и клинических исследований, связанных с анализом движений захвата и переноса объектов рукой. Это открывает широкие перспективы его применения как в экспериментальной нейронауке, так и в клинической практике.

Выводы

Сложные целенаправленные движения, такие как захват и перенос объектов рукой, представляют собой важный объект анализа в нейронауках и клинической практике. Их кинематическое исследование позволяет выявлять особенности моторного планирования, сенсомоторной интеграции и координации движений как у здоровых испытуемых, так и у пациентов с различными поражениями центральной и периферической нервной системы [1–3, 6]. Значительная часть исследований демонстрирует, что двигательные параметры, особенно в фазе переноса объекта, оказываются чувствительными маркерами нейромоторного дефицита, возникающего при инсульте [4, 14], болезни Паркинсона [5], болезни Альцгеймера [19] и других неврологических состояниях, включая офтальмологические нарушения [20]. Несмотря на значительное развитие технологий захвата движения, в существующих экспериментальных и клинических протоколах по-прежнему отсутствуют доступные, стандартизированные и воспроизводимые инструменты для автоматизированной обработки пространственно-временных параметров двигательных актов.

С целью устранения данного ограничения нами было разработано программное обеспечение Kinematic 4 — инструмент, предназначенный для автоматического анализа действий захвата и переноса на основе координат, полученных с помощью систем motion capture. Разработка основана на ранее верифицированных алгоритмах, осуществленных в среде MATLAB [15], и реализована в виде кроссплатформенного приложения с графическим интерфейсом, не требующим программ-

ных навыков. Программа поддерживает обработку как индивидуальных, так и групповых наборов данных и обеспечивает идентификацию ключевых временных точек: начала эксперимента, поднятия кисти, раскрытия пальцев, достижения максимальной апертуры, подъема и опускания объекта. Такой подход позволяет выделить функциональные фазы моторного действия, отличающиеся по вовлеченности центральных и периферических механизмов [3, 16–18]. Анализ этих фаз дает возможность более точно определить локализацию и характер возможного дефицита моторного контроля, включая нарушения механизмов обратной сенсорной связи [17] и планирования движения [16, 21].

Сравнительный анализ результатов, полученных в Kinematic 4, и ранее просчитанных MATLAB-алгоритмами на идентичных данных показал полное соответствие по всем ключевым метрикам. Это подтверждает точность переноса исходной логики вычислений в новый программный продукт. Внутреннее и пользовательское тестирование также продемонстрировало устойчивость работы алгоритмов и стабильность интерфейса при обработке данных различной длительности и качества.

Кроме научных задач, Kinematic 4 может быть использован в клинической практике для мониторинга

восстановительных процессов после инсульта, диагностики ранних моторных нарушений и оценки эффективности реабилитационных программ [4, 14]. Однако для надежной клинической интерпретации результатов необходимо предварительное накопление нормативных данных, охватывающих как здоровое население, так и различные нозологические группы. Это позволит сформировать репрезентативную базу пороговых значений, моторных профилей и диапазонов нормы для оценки отклонений в клинической практике.

Важным преимуществом программы является возможность экспорта данных в универсальные форматы (.xlsx), что облегчает статистический анализ и интеграцию в клинические базы. В перспективе планируется расширение функционала, включая поддержку дополнительных форматов, интеграцию с другими физиологическими сигналами (например, электроэнцефалографическими, электромиографическими) и внедрение модулей машинного обучения для предиктивной аналитики [17, 18, 21].

Таким образом, Kinematic 4 представляет собой заверченный, воспроизводимый и практически значимый инструмент, объединяющий точность, гибкость и удобство применения как в научных, так и в клинических контекстах.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- MacKenzie C. L., Iberall T. The Grasping Hand. Amsterdam: Elsevier, 1994. 256 p.
- Jeannerod M. The timing of natural prehension movements. *J Motor Behav* 1984;16(3):235–54. DOI: 10.1080/00222895.1984.10735307
- Castiello U. The neuroscience of grasping. *Nat Rev Neurosci* 2005;6(9):726–36. DOI: 10.1038/nrn1744
- Nowak D.A. The impact of stroke on the performance of grasping: Usefulness of kinetic and kinematic motion analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 2008;32(8):1439–50. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2008.04.017
- Fasano A., Mazzoni A. Reaching and grasping movements in Parkinson's disease: A review. *J Parkinsons Dis* 2022;12(4):1083–113. DOI: 10.3233/JPD-223102
- Wiesendanger M., Serrien D.J. Neurological problems affecting hand dexterity. *Brain Res Rev* 2001;36(2–3):161–8. DOI: 10.1016/S0165-0173(01)00085-6
- Betti S., Zani G., Guerra S. et al. Reach-to-grasp movements: A multimodal techniques study. *Front Psychol* 2018;9:990. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00990
- Sartori L., Spoto A., Gatti M., Straulino E. The shape of water: How tai chi and mental imagery effect the kinematics of a reach-to-grasp movement. *Front Physiol* 2020;11:297. DOI: 10.3389/fphys.2020.00297
- Frykberg G.E., Grip H., Alt Murphy M. How many trials are needed in kinematic analysis of reach-to-grasp? A study of the drinking task in persons with stroke and non-disabled controls. *J Neuroeng Rehabil* 2021;18(1):13. DOI: 10.1186/s12984-021-00806-w
- Paulignan Y., Frak V.G., Toni I., Jeannerod M. Influence of object position and size on human prehension movements. *Exp Brain Res* 1997;114(2):226–34. DOI: 10.1007/PL00005653
- Sziburi T., Blex S., Glasmachers T., Iossifidis I. Ruhr hand motion catalog of human center-out transport trajectories in 3D task-space captured by a redundant measurement system. *arXiv e-prints*; arXiv:2401.00562. DOI: 10.48550/arXiv.2401.00562
- Mazzarella J., Richie D., Chaudhari A.M. W. et al. Object weight and hand dominance impact kinematics in a functional reach-to-drink task in school-aged children. *Sensors (Basel)* 2024;24(16):5421. DOI: 10.3390/s24165421
- Choi H., Park D., Rha D.W. et al. Kinematic analysis of movement patterns during a reach-and-grasp task in stroke patients. *Front Neurol* 2023;14:1225425. DOI: 10.3389/fneur.2023.1225425
- Murphy M.A., Willén C., Sunnerhagen K.S. Kinematic variables quantifying upper-extremity performance after stroke during reaching and drinking from a glass. *Neurorehabil Neural Repair* 2011;25(1):71–80. DOI: 10.1177/1545968310370743
- Вязьмин А.О., Рагимова А.А., Си Г.Л. и др. Эффективность перемещения предмета в зависимости от его ориентации в пространстве: кинематический анализ моторного планирования и выполнения. *Нервно-мышечные болезни* 2024;14(3):38–53. DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2024-14-3-38-53>
- Vyazmin A.O., Ragimova A.A., Si G.L. et al. Efficiency of object movement depending on its orientation in space: kinematic analysis of motor planning and execution. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular Diseases* 2024;14(3):38–53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2024-14-3-38-53>

16. Wong A.L., Haith A.M., Krakauer J.W. Motor planning. *Neurosci* 2015;21(4):385–98. DOI: 10.1177/1073858414557845
17. Johansson R.S., Flanagan J.R. Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks. *Nat Rev Neurosci* 2009;10(5):345–59. DOI: 10.1038/nrn2621
18. Scott S.H. Optimal feedback control and the neural basis of volitional motor control. *Nat Rev Neurosci* 2004;5(7):532–45. DOI: 10.1038/nrn1427
19. Zhang J., Xiao Yu., Li Z.-M. et al. Reach-to-grasp kinematics and kinetics with and without visual feedback in early-stage Alzheimer's disease. *J Neuroeng Rehabil* 2022;19(1):121. DOI: 10.1186/s12984-022-01060-5
20. Pardhan S., Scarfe A., Bourne R., Timmis M. A comparison of reach-to-grasp and transport-to-place performance in participants with age-related macular degeneration and glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2017;58(3):1560–9. DOI: 10.1167/iops.16-21008
21. Shadmehr R., Krakauer J.W. A computational neuroanatomy for motor control. *Exp Brain Res* 2008;185(3):359–81. DOI: 10.1007/s00221-007-1269-0

Вклад авторов

A.O. Вязьмин: разработка и дизайн исследования, написание статьи;
 М.Р. Чапанова, М.С. Морозов: подготовка проектной документации к программному обеспечению, написание программного обеспечения, сравнительный анализ полученных данных;
 С.А. Аксенов: разработка исследования;
 М. Феурра: разработка и дизайн исследования.

Authors' contributions

A.O. Vyazmin: conceptualization and study design, article writing;
 M.R. Chapanova, M.S. Morozov: preparation of technical documentation for the software, software development, comparative data analysis;
 S.A. Aksenov: study design;
 M. Feurra: conceptualization and study design.

ORCID авторов / ORCID of authors

A.O. Вязьмин / A.O. Vyazmin: <https://orcid.org/0000-0003-2346-4222>
 М.Р. Чапанова / M.R. Chapanova: <https://orcid.org/0009-0003-4328-5325>
 М.С. Морозов / M.S. Morozov: <https://orcid.org/0009-0003-9388-2849>
 С.А. Аксенов / S.A. Aksenov: <https://orcid.org/0000-0003-4403-7246>
 М. Феурра / M. Feurra: <https://orcid.org/0000-0003-0934-6764>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

Funding. The study was carried out within the framework of the Fundamental Research Program of the National Research University “Higher School of Economics”.