

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА АНАЛИЗА КРИВЫХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ МЕЛКОЙ МОТОРИКИ И КОГНИТИВНЫХ НАВЫКОВ НА ПРИМЕРЕ ЯПОНСКОЙ ПИСЬМЕННОСТИ

Биневский И.А., Власова Г.А.

*Институт информационных технологий БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь,
ibinevsky@gmail.com, g.vlasova@bsuir.by*

В статье представлен адаптивный алгоритм анализа кривых, ориентированный на развитие мелкой моторики и когнитивных навыков. Подход основан на сравнении локальных характеристик штрихов и позволяет точно оценивать форму, направление и длину пользовательского ввода. Метод демонстрирует эффективность в образовательных и реабилитационных задачах, включая обучение японской письменности, обеспечивая персонализированную обратную связь и поддержку самостоятельных тренировок.

Ключевые слова: мелкая моторика, когнитивные навыки, сравнение кривых, адаптивный алгоритм, графомоторные навыки, японская письменность, реабилитационные технологии.

В эпоху стремительного развития технологий и внедрения инклюзивных образовательных практик, разработка программных решений, направленных на реабилитацию и развитие когнитивных и физических способностей людей с особыми потребностями, приобретает особую значимость [1]. Важным направлением здесь является совершенствование мелкой моторики – сложного взаимодействия нервной, мышечной и костной систем, зачастую в сочетании с визуальным восприятием.

Развитие мелкой моторики напрямую связано с развитием речи, памяти, внимания и мышления [2]. Нарушения графомоторных навыков создают серьёзные барьеры в обучении письму, в повседневной жизни и в профессиональной деятельности, требующей манипуляций с мелкими объектами. Традиционные методики тренировки и восстановления этих навыков, такие как прописи, штриховка, рисование по контуру, требуют постоянного присутствия педагога или реабилитолога для оценки правильности выполнения упражнений. Автоматизация этого процесса с помощью программных средств открывает новые возможности для самостоятельного обучения и реабилитации. Также это позволяет проверять результаты удалённо, стандартизировать и анализировать их, и на основе анализа адаптировать и персонализировать упражнения.

Развитие мелкой моторики тесно связано с формированием высших психических функций. В процессе взросления движения руки совершенствуются от простого захвата предметов до сложных действий, требующих точной сенсомоторной координации. Ученые Н.А. Бернштейн [3] и М.М. Кольцова [4] утверждают, что развитие зон мозга, отвечающих за точные движения кисти, идет параллельно с развитием речевых центров.

К старшему дошкольному и младшему школьному возрасту дети должны научиться делать вертикальные и горизонтальные штрихи, повторять циклические движения и копировать геометрические фигуры [5]. Это является основой для овладения письмом и сложными трудовыми умениями. Недостаточное развитие этих навыков приводит к быстрой утомляемости и снижению когнитивной эффективности.

В педагогике и нейропсихологии для диагностики и тренировки этих навыков используются стандартизированные графические методики, оценивающие зрительно-моторную координацию. Например, методика «Домик» Н.И. Гуткиной [6] требует от испытуемого скопировать сложное изображение, состоящее из элементов прописных букв. Точность копирования служит показателем произвольного внимания и пространственного восприятия. Тест Керна-Йерасика включает в себя задачи на копирование письменного текста и групп точек, что позволяет оценить тонкую моторику и способность руки следовать заданному паттерну. Также используются задания на точность и плавность движений, такие как методика «Дорожки» Л.А. Венгера [7]. В этом задании нужно провести непрерывную линию внутри узкого коридора, не отрывая карандаш и не касаясь границ. Такие упражнения выявляют тремор.

Все эти методики объединяет общий принцип – наличие визуального эталона, который нужно воспроизвести с минимальными отклонениями. Для автоматизации данных методов требуется алгоритм, способный оценить длину, направление и совпадение эталона с вводом пользователя. Для решения данной задачи было рассмотрено несколько методов:

1 Алгоритм попиксельного сравнения [8] заключается в нормализации и растеризации обеих кривых для последующего сравнения полученных изображений. Сходство вычисляется как отношение совпавших пикселей к общему их числу. Метод оказался слишком чувствительным и неточным. Кроме того, данный метод не учитывает динамику рисования и направления кривой.

2 Метод наименьших квадратов [9]. Для каждой точки одной кривой можно найти ближайшую точку на другой кривой и вычислить квадрат евклидова расстояния между ними. Беря точки с двух кривых по порядку, данный алгоритм позволяет учесть направление кривой. Сумма таких квадратов ошибок, усреднённая по количеству точек, даст меру расхождения. Данный метод оказался слишком неточным и слишком зависимым от количества точек и сильной нормализации двух кривых.

3 Алгоритм динамической трансформации временной шкалы [10] является высокоэффективным методом для сравнения временных последовательностей, который находит оптимальное нелинейное выравнивание между ними. Он устойчив к различиям в скорости рисования кривой и является стандартом во многих задачах, например, в распознавании речи. Его недостатками является высокая вычислительная сложность, которая в классической реализации составляет $O(N \times M)$, где N и M – количество точек в сравниваемых кривых, а также необходимость в точной настройке: без ограничений пути, нормализации траекторий и точной локальной метрики данный алгоритм может ложно выравнивать непохожие участки, сопоставляя сходные формы, смещённые по времени.

В связи с недостатками существующих подходов был разработан собственный гибридный алгоритм сравнения кривых. Предлагаемый алгоритм основан на представлении кривой через локальные характеристики и их сравнения вдоль нормализованной длины. Далее перечислены этапы данного алгоритма:

1 Каждая кривая, состоящая из множества точек, разбивается на короткие прямые отрезки, соединяющие соседние точки. Слишком короткие отрезки отбрасываются, чтобы уменьшить их количество и упростить форму, поскольку различные типы ввода могут насчитать слишком большое количество лишних точек, которые слишком близко друг к другу.

2 Для каждого отрезка вычисляется его угол, который является направлением данного отрезка. Это позволяет понять динамику рисования штриха.

3 Складывая длины отрезков, находится общая длина всей кривой. Путём деления длины каждого отрезка на общую длину всей кривой находится относительное положение и вес каждого отрезка в процентах. Это позволяет нормализовать две кривые для их сравнения. В результате получается стандартизированный набор данных, где для каждой точки известно её направление и относительное расстояние от начала.

4 Перебирая каждый отрезок кривой от начала до конца, на каждом небольшом участке пути необходимо сравнить углы эталонной и пользовательской кривых.

5 Суммируя все эти расхождения в углах на протяжении всего пути, учитывая систему

штрафов, где небольшие отклонения слабо влияют на оценку, а серьёзные – сильно, получаем накопленную ошибку.

6 По отношению накопленной ошибки к максимально возможной ошибке получаем оценку точности формы. Чем меньше суммарное расхождение в углах, тем выше оценка. По отношению длины пользовательской кривой к эталонной находим оценку точности длины.

Таким образом, данный алгоритм позволяет получить две независимые оценки, которые характеризуют качество написания штриха. Сложность данного алгоритма растёт прямо пропорционально общему количеству точек и представляет собой $O(N+M)$. Формула штрафа, пороговое значение угла, коэффициенты, определяющие штраф, а также проходные значения по форме и по длине могут быть подобраны для каждой задачи и каждого упражнения эмпирически, что делает данный алгоритм адаптивным и персонализируемым.

Практическая апробация данного метода была проведена на примере задачи изучения письменности восточных языков, в частности японского. Данный выбор обусловлен тем, что иероглифика требует высочайшей степени координации, развитой зрительной памяти и точной мелкой моторики. Правильность написания иероглифов зависит от длины, направления и точности мелких штрихов, что делает данную апробацию идеальным сложным паттерном для тренировки графомоторных функций. Это позволяет продемонстрировать работу данного алгоритма не только для людей с ограниченными возможностями, но и в более широком применении.

На рисунке 1 представлен символ японской азбуки, записывающийся как «о» в русской транскрипции по методике Поливанова, а также порядок и направление штрихов.

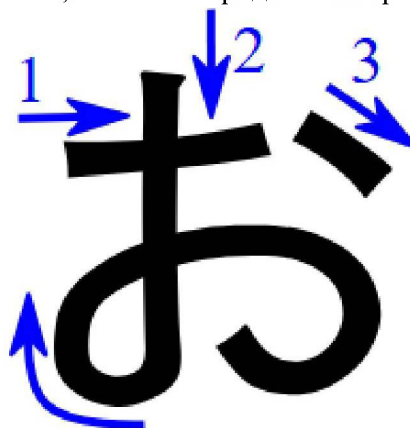


Рисунок 1 – Символ японской азбуки «о»

На рисунке 2 представлен экран интерфейса приложения, реализующий разработанный алгоритм сравнения кривых, который сравнивает пользовательский ввод с эталоном. На данном рисунке пользовательский ввод соответствует шаблону, и алгоритм выдаёт высокий процент соответствия.



На рисунке 3 представлен пользовательский ввод, где все штрихи нарисованы в противоположном направлении, и алгоритм, учитывая направления, выдаёт нулевой процент соответствия.



На рисунке 4 представлен пользовательский ввод, в котором штрихи сохраняют направление и общую форму, но нарисованы менее точно.

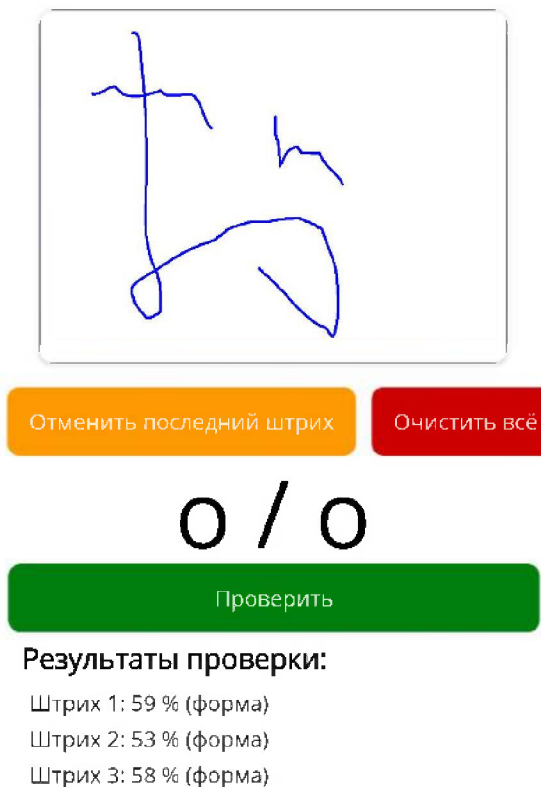


Рисунок 4 – Неточный ввод

Таким образом, разработанный адаптивный алгоритм сравнения кривых представляет собой эффективный инструмент для развития мелкой моторики и когнитивных навыков. Этот метод анализирует направление, последовательность и длину линий, предоставляя качественную обратную связь. Применение подобных алгоритмов в образовательных и реабилитационных приложениях способствует:

- повышению мотивации за счёт лёгкости и удобства работы;
- возможности самостоятельных тренировок без постоянного надзора специалиста;
- развитию нейронных связей через выполнение сложных координационных задач.

Перспективы совершенствования системы заключаются в анализе данных, которые формируются алгоритмом, и интеграции технологий искусственного интеллекта для адаптивного изменения параметров в зависимости от специфики задач и индивидуальных особенностей моторики конкретного пользователя.

Литература

1. Ганчарик, Л. П. Методологические аспекты подготовки лиц с особыми потребностями в цифровой образовательной системе обучения / Л. П. Ганчарик // Непрерывное профессиональное образование лиц с особыми потребностями: сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Минск, 9–10 декабря 2021 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: А. А. Охрименко [и др.]. – Минск, 2021. – С. 63–66.
2. Шевцова, Я. В. Результаты корреляционного анализа соотношения показателей психомоторных качеств и перцептивно-когнитивного развития у младших школьников с разным уровнем интеллектуального развития / Я. В. Шевцова // Гуманитарный вектор. Серия: Педагогика, психология. – 2014. – № 1 (37). – С. 161–169.
3. Бернштейн, Н. А. О ловкости и её развитии / Н. А. Бернштейн. – М.: Физкультура и спорт, 1991. – 288 с.
4. Кольцова, М. М. Двигательная активность и развитие функций мозга / М. М. Кольцова. – М.: Педагогика, 1973. – 142 с.
5. Безруких, М. М. Как подготовить ребёнка к школе / М. М. Безруких. – Тула: Арктоус, 2007. – 71 с.
6. Гуткина, Н. И. Психологическая готовность к школе / Н. И. Гуткина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Академический Проект, 2000. – 184 с.
7. Венгер, Л. А. Воспитание сенсорной культуры ребёнка от рождения до 6 лет / Л. А. Венгер.

– М.: Просвещение, 1988. – 202 с.

8. Дьяконов, В. П. Обработка сигналов и изображений: специальный справочник / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

9. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М.: Физматгиз, 1962. – 352 с.

10. Senin, P. Dynamic time warping algorithm review / P. Senin // Information and Computer Science Department University of Hawaii at Manoa. – Honolulu, USA, 2008. – Vol. 855. – P. 1–23.

**APPLICATION OF AN ADAPTIVE CURVE ANALYSIS ALGORITHM FOR THE
DEVELOPMENT OF FINE MOTOR SKILLS AND COGNITIVE ABILITIES DEMONSTRATED
THROUGH JAPANESE SCRIPT**

Bineuski I.A., Vlasova G.A

Institute of Information Technologies BSUIR, Minsk, Republic of Belarus

The article presents an adaptive curve analysis algorithm aimed at developing fine motor skills and cognitive abilities. The approach is based on comparing the local characteristics of strokes and allows for the accurate evaluation of the shape, direction, and length of user input. The method demonstrates effectiveness in educational and rehabilitation tasks, including teaching Japanese writing, by providing personalized feedback and supporting independent practice.

Keywords: fine motor skills, cognitive abilities, curve comparison, adaptive algorithm, graphomotor skills, Japanese writing, rehabilitation technologies.