

Программное обеспечение с открытым исходным кодом для анализа результатов окулографических исследований

Мармалюк П.А.,

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией математической психологии и прикладного программного обеспечения Центра информационных технологий для психологических исследований ГБОУ ВПО МГППУ, Москва, Россия, pavel.marmalyuk@gmail.com

Жегалло А.В.,

Кандидат психологических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной психологии ГБОУ ВПО МГППУ, Москва, Россия, zhegs@mail.ru

Юрьев Г.А.,

Кандидат физико-математических наук, доцент факультета информационных технологий ГБОУ ВПО МГППУ, Москва, Россия, nezdesni@gmail.com

Панфилова А.С.

программист лаборатории математической психологии и прикладного программного обеспечения Центра информационных технологий для психологических исследований ГБОУ ВПО МГППУ, Москва, Россия, panfilova87@gmail.com

Представлен обзор существующего проприетарного и открытого программного обеспечения анализа результатов окулографических исследований, кратко рассмотрены преимущества и недостатки существующих решений. Обоснована актуальность разработки новой системы, свободной от указанных недостатков. Представлены концепция и проект программной системы с открытым исходным кодом для анализа окулографических данных, полученных с помощью видеорегистраторов движений глаз. Отражены специфические особенности разрабатываемой системы, в частности, открытость программного кода, принцип модульности (расширяемости) и объектно-ориентированности.

Ключевые слова: движения глаз, программное обеспечение, айтирекинг, язык программирования R, математическая обработка данных психологического эксперимента.

Open-source software for oculography data analysis

Marmalyuk P.A.,

PhD (Computer Science), Head of the Laboratory of Mathematical Psychology and Applied Software of the Centre of Information Technologies for Psychological Studies, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, pavel.marmalyuk@gmail.com

Zhegallo A.V.,

PhD (Psychology), Senior Researcher, Centre of Experimental Psychology, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, zhegs@mail.ru

Yuryev G.A.,

PhD (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Department of Computer Science, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, nezdesni@gmail.com

Panfilova A.S.

Programmer, Laboratory of Mathematical Psychology and Applied Software of the Centre of Information Technologies for Psychological Studies, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, panfilova87@gmail.com

An overview of existing proprietary and open source software for oculography data analysis is presented which briefly discuss the advantages and disadvantages of existing solutions. The urgency of developing a new system which is free of specified drawbacks is justified. A concept and design of an open source software system for analysis of oculography data obtained using video-oculography hardware systems. Specific features of the developed system are outlined, in particular, an open source code, a principle of modularity (expandability) and a principle of object-orientation.

Keywords: eye movements, software, eye tracking, R programming language, psychological experiment's data analysis.

Введение

Движения глаз человека и их направленность позволяют раскрыть структуру взаимоотношений индивида со средой, человека с миром. Тесные связи окуломоторики с центральной нервной системой, с одной стороны, с содержанием психических процессов — с другой, с многообразными формами активности (поведением, деятельностью, общением) — с третьей, позволяют через анализ движений глаз изучать механизмы работы мозга и их нарушения, выявлять динамику состояний, закономерности восприятия, мышления, представлений, проследивать интенции, намерения и установки личности. Знания о движениях глаз могут быть использованы в интересах многих профессий.

Популярность окуломоторной тематики в последние годы неуклонно растет, а вместе с ней и число научных и коммерческих исследований, использующих движения глаз как индикатора внимания, психофизиологических состояний, психических процессов и поведения (Барабанщиков, Жегалло, 2013). Всплеск интереса к окулографии связан с появлением удобных средств бесконтактной видеорегистрации направленности взора (видеоокулографов), стоимость которых неуклонно падает. Сформировался новый термин, определяющий, наряду с инструментальной и измерительной методологической базой, информационно-коммуникативную и интерпретационную составляющие видеоокулографии, — *айтрекинг* (Барабанщиков, Жегалло, 2013).

Все более широкое применение аппаратных средств айтрекинга в экспериментальной психологии неизбежно повышает востребованность специализированного программного обеспечения (ПО) для обработки и статистического анализа продуцируемых многомерных временных сигналов, содержащих данные о положении взора, размерах зрачка, окуломоторных событиях и других характеристиках глазодвигательной активности. Экспериментальным исследователям, использующим айтрекеры в своей научно-практической деятельности в области психологии восприятия, педагогики, психологии общения, маркетинга и многих других, крайне необходимы программные средства, автоматизирующие рутинную расчетную и аналитическую работу.

На данный момент существует достаточно обширный ряд программных продуктов для анализа данных видеоокулографии, однако, их эффективное применение сдерживается рядом недостатков, обусловленных, в частности, отсутствием единых стандартов представления и хранения данных, проприетарностью реализаций алгоритмов, платформозависимостью, неразвитым математическим аппаратом, реализуемым в штатных решениях.

Ни одно из существующих программных решений не является законченным с точки зрения пригодности для научной работы. Типичный сценарий работы специалиста при обработке данных выглядит так:

- 1) обработка первичных данных с помощью специализированного ПО;
- 2) экспорт обработанных данных в табличный формат общего назначения;
- 3) ручная агрегация таблиц результатов, например, в табличном редакторе;

- 4) импорт таблиц данных во внешние программы для статистической обработки;
- 5) проведение статистического анализа.

Данная последовательность каждый раз повторяется заново при любых изменениях в исходных данных (например, добавилось еще несколько испытуемых). При этом в массовых статистических пакетах общего назначения исходные данные должны быть представлены в виде единой стандартной таблицы, что очевидно накладывает ограничения на объем передаваемых для статистической обработки исходных данных.

Обилие выполняемых вручную операций провоцирует появление неконтролируемых операторских ошибок при обработке. Использование для первичного анализа проприетарного ПО, распространяемого с защитой от копирования, является дополнительным фактором, затрудняющим переобработку ранее полученных данных.

Статья посвящена проекту по созданию бесплатно распространяемой программной системы с открытым исходным кодом, свободной от перечисленных недостатков, основными целями которого являются:

- 1) автоматизация расчетно-аналитической деятельности, связанной с анализом экспериментальных данных окулографии, за счет реализации в системе функций расчета основных характеристик глазодвигательной активности, их агрегации и анализа результирующих сводных таблиц с использованием статистических методов проверки гипотез;
- 2) поддержка процесса порождения гипотез по данным (post-hoc анализ) за счет реализации методов эксплораторного анализа данных (например, факторного или кластерного анализа), позволяющих обнаруживать закономерности, которые либо сложно было предугадать или сформулировать в виде гипотез на этапе планирования эксперимента, либо не укладывающиеся в рамки текущей парадигмы научных представлений в области и, следовательно, являющихся маловероятными кандидатами;
- 3) устранение организационных издержек, связанных с использованием платных программных продуктов, путем размещения дистрибутивов разрабатываемой системы в сети Интернет, что обеспечит также возможность перепроверки научных результатов;
- 4) закрепление формирующихся стандартов обработки данных путем открытой реализации нескольких подходов к анализу окулографических данных (наиболее устоявшихся), что повысит надежность получаемых результатов;
- 5) создание предпосылок для дальнейшего расширения и развития проекта за счет надстраиваемой модульной структуры разрабатываемой системы с базовым ядром и возможности использования программы на компьютерах и серверах с различными операционными системами.

Обзор существующих систем анализа данных окулографии: платные системы

Производителями айтрекеров поставляется штатное программное обеспечение, ориентированное исключительно на работу с данными, полученными с помощью их оборудования. Для айтрекеров фирмы Sensomotoric Instruments это **BeGaze** (Sensomotoric Instruments GmbH, 2014), для айтрекеров Interactive Minds – **NYAN** (Nyan, 2013), для айтрекеров Tobii – **Tobii Studio** (Tobii Studio, 2013).

Штатное программное обеспечение анализа данных обеспечивает основную необходимую функциональность: визуализацию исходных данных, детекцию фиксаций, саккад и морганий, визуализацию траекторий рассматривания, визуализация областей стимула, привлекающих внимание, нанесение на изображение статических областей интереса и вычисление основных показателей окуломоторной активности для них.

Также следует отметить наличие платных решений, поддерживающих различные виды айтрекеров, и предоставляющих широкий функционал по обработке данных, например, **EyeWorks** (EyeTracking Inc., 2013), созданный «исследователями для исследователей», которое позиционируется как универсальное ПО, работающее с

большинством современных айтрекинговых систем. На сегодняшний день на сайте разработчика указана совместимость с 18 системами 8 производителей. Дополнительно разработчик заявляет о возможности адаптации ПО под оборудование, используемое покупателем. Однако, судя по приведенному краткому описанию, функциональность программы в части анализа ограничена наиболее употребительными базовыми функциями.

Преимуществами платного ПО являются:

- ✓ высокое качество;
- ✓ обширный функционал (в дополнительно подключаемых платных пакетах);
- ✓ наличие официальной технической поддержки.

Недостатками являются:

- ✗ бедный функционал (в базовых пакетах) – зачастую реализован только один алгоритм детекции фиксаций или саккад и отсутствует возможность детекции *глитсад* (Holmqvist et al., 2011);
- ✗ привязка к проприетарным форматам входных данных, порождаемых оборудованием конкретного производителя;
- ✗ частичная закрытость используемых алгоритмов;
- ✗ отсутствие методов статистического анализа данных (пользователям, как правило, предлагается экспортировать результаты расчетов для дальнейшего анализа в прикладных статистических пакетах);
- ✗ поставляемое ПО, как правило, защищено электронными ключами, что значительно ограничивает возможности его легального использования.

Можно утверждать, что проприетарное ПО ориентировано на проведение коммерческих исследований и парадигму разделения труда между специалистами (один специалист выполняет анализ данных во всех проводимых в организации исследованиях). В такой парадигме закрытость ПО – несомненное достоинство, поскольку специалист не должен выходить за рамки своей компетенции. Однако парадигма закрытого коммерческого ПО абсолютно не релевантна научно-исследовательским задачам, предполагающим полную открытость и воспроизводимость проводимых исследований.

Бесплатные и условно-бесплатные системы

Исследователи, не удовлетворенные функциональностью, стоимостью и другими характерными чертами коммерческого ПО, создали ряд свободно распространяемых программ, решающих частные задачи обработки данных. Среди них можно отметить следующие:

1. **OGAMA** (Open Gaze and Mouse Analyzer) (Voßkühler et al., 2008): представляет собой монолитную программу на языке программирования C#, написанную с использованием библиотек .NET. Анализируемые данные хранятся в базе Microsoft SQL, обладает достаточно широкой функциональностью, сопоставимой с возможностями штатного ПО обработки данных.

Достоинства системы OGAMA:

- ✓ открытость исходного кода;
- ✓ сравнительно широкая функциональность и гибкость;
- ✓ частые обновления;
- ✓ возможность работы с данными айтрекеров разных производителей.

Недостатки:

- ✗ платформозависимость (работа только на компьютерах под управлением операционных систем линейки Microsoft Windows, начиная с ОС Windows XP);
- ✗ структура программы и базы данных не позволяет выполнять доработку ПО без полного анализа исходного кода, что делает проблематичным и нецелесообразным дальнейшую доработку собственными силами;

- ✗ один алгоритм обнаружения фиксаций и саккад (I-DT).
2. **GazeParser** (Sogo, 2013): открытая библиотека программных функций для регистрации глазодвигательной активности с помощью недорогих устройств (веб-камеры, штучные прототипы), визуализации траекторий и анализа данных. Примечательно, что библиотека написана на языке Python и может использоваться совместно с системами автоматизации психофизиологических экспериментов, такими как PsychoPy или VisionEgg. К сожалению, библиотека на данный момент поддерживает только первичную обработку данных.
- Достоинства библиотеки GazeParser:
- ✓ открытость исходного кода;
 - ✓ кросс-платформенность;
 - ✓ совместимость с открытыми программными системами автоматизации эксперимента.
- Недостатки:
- ✗ бедный функционал для анализа данных;
 - ✗ для успешного использования требует навыков программирования.
3. **DynAOI** (Dynamic Areas of Interest) (Papenmeier, Huff, 2010): открытое узкоспециализированное ПО, позволяющее создавать динамические зоны интереса. Автоматически работает с анимацией, базируемой на трехмерных моделях представления. DynAOI незаменима при анализе данных айтрекинга, зарегистрированных при просмотре видеозаписей или в реальных жизненных ситуациях. Требуется предварительного создания трехмерной модели релевантного видеоматериала. Записанные данные сопоставляются со статическими и динамическими объектами модели, которые можно рассматривать как статические или динамические зоны интереса. После сопоставления можно проводить статистический анализ результатов.
- Достоинства ПО DynAOI:
- ✓ открытость исходного кода;
 - ✓ решает непростую задачу создания и анализа динамических зон интереса.
- Недостатки:
- ✗ для успешного использования требует навыков создания специальных 3D-моделей;
 - ✗ бедный функционал для анализа данных;
 - ✗ работа с данными одной траектории (невозможность проведения выборочного анализа).
4. **EyePatterns** (West et al., 2006): программа с открытым исходным кодом для обнаружения закономерностей в последовательностях фиксаций и статистическое обнаружение экспериментальных факторов, влияющих на их характеристики. Анализ фиксаций с помощью EyePatterns позволяет, например, исследовать скрытые когнитивные стратегии, влияющие на движения глаз. Отличительной чертой программы является удобный и оригинальный дизайн графического интерфейса, позволяющий пользователю видеть всю важную информацию на одном экране (что не так уж и просто, учитывая размерности айтрекинговых данных и число анализируемых признаков).
- Достоинства программы EyePatterns:
- ✓ открытость исходного кода;
 - ✓ удобный и понятный оригинальный интерфейс;
 - ✓ возможность проведения выборочного анализа.
- Недостатки:
- ✗ бедный функционал для анализа данных.

5. Пакеты, выполняемые в среде MATLAB (Matrix Laboratory): **iLAB** (Gitelman, 2002), **iMAP** (Caldara, Mielliet, 2011), **EMD** (Komogortsev, 2013), реализующие:

- ✓ первичную фильтрацию данных, детекцию фиксаций и саккад: алгоритмы I-VT, I-NMM, I-DT, I-MST, I-KFG (Komogortsev et al., 2010);
- ✓ детекцию следящих движений: алгоритмы I-VVT, I-VMP и I-VDT (Komogortsev, Karpov, 2013);
- ✓ построение карт распределения внимания и статистический анализ различий между распределениями на основе теории случайных процессов и полей (Caldara, Mielliet, 2011).

Использование данных пакетов предполагает наличие установленной системы MATLAB и требует от исследователя навыков и знаний программиста. Таким образом, самостоятельное использование таких программ психологом – экспериментатором не всегда возможно.

Достоинства пакетов:

- ✓ открытость исходного кода;
- ✓ кроссплатформенность;
- ✓ достаточно широкая функциональность и продвинутые методы анализа.

Недостатки:

- ✗ для модификации требуется наличие установленной платной системы MATLAB;
- ✗ для успешного использования требует навыков программирования;
- ✗ не всегда предусмотрен выборочный статистический анализ данных (работа с данными одной траектории).

6. Пакеты, выполняемые в среде для статистических вычислений R (R – язык программирования, 2014):

а. Пакет **em2** (Logacev, Vasishth, 2013) был создан для расчета статистик времени чтения, используемых психолингвистами (например, длительность первой фиксации, общее время чтения, время перечитывания и т.п.). Подразумевает наличие данных о фиксациях, рассчитанных во внешних приложениях.

б. Пакет **eyetracking** (Hore, 2014), несмотря на многообещающее название, включает только две функции для вычисления расстояния между двумя точками на экране стимульного монитора в сантиметрах и угловых градусах.

в. Пакет **gazetools** (Hore, 2013) по функциональности является одним из самых проработанных решений для среды R, поддерживающий несколько форматов данных, несколько алгоритмов детекции фиксаций, саккад и глиссад, а также возможность работы со статическими зонами интереса. Пакет не позволяет выполнять выборочный статистический анализ данных и является, скорее, вспомогательным набором функций, чем законченной системой. Однако следует сказать, что, судя по постоянным обновлениям репозитория данного проекта, ведется активная работа над совершенствованием пакета.

Достоинства пакетов:

- ✓ открытость исходного кода.

Недостатки пакетов:

- ✗ функциональность;
- ✗ невозможность проведения выборочного анализа.

Актуальность разработки новой системы

Производители оборудования поставляют совместно с ним ПО, включающее, в основном, функциональность, достаточную для решения основных практических задач и ориентированное исключительно на работу с оборудованием данного производителя.

Общепринятая до недавнего времени технология обработки айтрекингových данных предполагает расчет конкретных показателей окуломоторной активности с использованием штатного ПО производителя оборудования, группировку полученных результатов согласно конкретному экспериментальному плану в табличном редакторе (например, Microsoft Excel) и заключительную статистическую обработку с использованием специализированных пакетов статистической обработки (например, SPSS). Недостатком данного подхода является высокая трудоемкость и ненадежность, связанная с многочисленными ручными операциями. Помимо этого значительные проблемы связаны с использованием для первоначальной обработки данных штатного ПО. Как правило, в базовой комплектации не реализуется расчет значительной части показателей окуломоторной активности, а детали используемых алгоритмов обработки данных зачастую представляют собой «коммерческую тайну» производителя.

Дополнительным препятствием для эффективного использования может стать защита штатного ПО от копирования, создающая на этапе анализа экспериментальных данных немалые организационные трудности. Существующие на данный момент коммерческие программные решения анализа данных психологического эксперимента являются, как правило, локальными лабораторными системами, доступными (физически) для использования только с определенных рабочих мест научной организации, в то время как условия труда современного исследователя зачастую характеризуются мобильностью (работа на дому, участие в командировках и прохождение стажировок).

Возможности существующих программных продуктов (как открытых, так и проприетарных) не полностью соответствуют потребностям исследователей, так как их разработчики предлагают неразвитый математический аппарат, зачастую ограничиваясь средствами визуального анализа и простейшей статистикой, пренебрегая методами исследования временной динамики, автоматизированными процедурами выделения проблемных категорий испытуемых и возможностями математического моделирования для проведения их кластеризации и классификации.

Анализ существующих систем показывает, что на данный момент отсутствует приемлемое решение, позволяющее психологу-экспериментатору самостоятельно выполнять полный цикл обработки экспериментальных данных окулографии. Однако им может стать программная система с базовой функциональностью, наращиваемой за счет подключения дополнительных модулей расширения. Можно утверждать, что психологам-экспериментаторам необходимо программное обеспечение:

- 1) кроссплатформенное, доступное для бесплатной установки на любом современном компьютере;
- 2) реализующее традиционные статистические подходы к анализу данных и имеющее возможность подключения дополнительных модулей расширения функциональности без изменения ядра системы;
- 3) не требующее от психолога навыков программиста (или помощи программиста) при выполнении уже реализованных способов обработки данных, то есть представляющее интуитивно понятный графический интерфейс с элементами диалога;
- 4) открытое, с доступным для экспертного анализа программным кодом.

Далее представлены концепция и планируемая функциональность разрабатываемой системы, соответствующей указанным критериям. Важно отметить, что в данной статье, подготовленной для психологического журнала, не рассматривается логическая модель базы данных, а также структура классов системы. Данные аспекты проекта могут быть изучены заинтересованным читателем по проектной документации, доступной в сети Интернет в репозитории проекта (Marmalyuk, 2014). Следует отметить, что для разработки системы было решено использовать язык программирования для статистических вычислений R в рамках объектно-ориентированной парадигмы. Важные следствия такого

выбора, касающиеся конечного пользователя системы, отражены в подразделе «Отличительные особенности системы» данной статьи.

Основные характеристики и возможности разрабатываемой системы

Концепция. Единичный айтрекинг-эксперимент можно обобщенно определить как особого рода взаимодействие экспериментатора и испытуемого в соответствии с планом (дизайном, алгоритмом) эксперимента, проводящегося с использованием специализированного аппаратно-программного (айтрекер, средства синхронизации, компьютеры и мониторы, штатное ПО) и материального (бумажные инструкции, стимульный материал) обеспечения. В результате эксперимента формируются экспериментальные данные: «сырые» и «событийные» данные, данные об испытуемых, стимулы и взаимно-однозначное соответствие айтрекинг-данных и стимулов, использованных в эксперименте. Схематично это проиллюстрировано на рисунке 1.

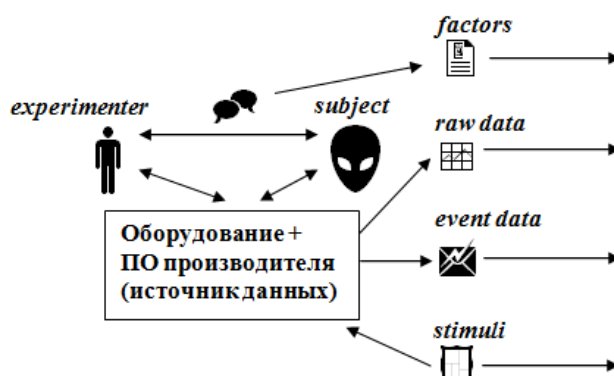


Рисунок 1. Выходные данные окулографического эксперимента.

На рисунке 1 «raw data» – «сырая» последовательность отсчетов траектории и других параметров, характеризующих экспериментальные условия, «event data» – «событийные» данные, рассчитанные с помощью ПО производителя (*могут отсутствовать*, поскольку в системе будут реализованы все основные алгоритмы детекции окуломоторных событий по исходным данным), «stimuli» – непосредственно файлы стимулов (картинки или видео), используемые в эксперименте. «Сырые» данные могут быть получены как монокулярным, так и бинокулярным айтрекером на разных частотах дискретизации, содержат сведения об удалении испытуемого от плоскости стимула (важно для расчета ряда параметров в стандартных единицах измерения, а не пикселях), атрибуты стимулов (названия файлов, размерности), размере зрачка, о программе для экспорта данных. При этом один файл с «сырыми» данными может содержать информацию по нескольким испытаниям. «Событийные» данные могут содержать результаты детекции таких событий, как фиксации, саккады, глissады, моргания и другие артефакты, выполненной внешним программным обеспечением.

Таблицы факторов («factors») есть таблицы значений качественных и количественных характеристик, определяющих те свойства исследуемых объектов, которые релевантны экспериментальной задаче. Например, таблица факторов испытуемых может определять такие важнейшие признаки испытуемых, как возраст и пол, а таблица факторов стимулов задавать такие атрибуты, как уровень яркости и размер шрифта. При таком подходе у экспериментатора появляется возможность выразить важные особенности процедуры эксперимента в стандартном представлении, что существенно упрощает реализацию в системе дальнейших операций по выборке данных для сравнительного анализа.

Учитывая вариативность конфигураций оборудования и наличие разных версий стандартных форматов экспортируемых данных, необходимо ввести вспомогательное

свойство данных – их *источник*, определяющее конкретный формат представления экспортируемых «сырых» и «событийных» экспериментальных данных.

Предлагается рассматривать источники трех типов: *foreign* (внешний), *own* (ранее загруженные в систему данные и сохраненное рабочее пространство пользователя в формате *RData* среды R) и *user-defined* (пользовательский). От типа и наименования внешнего источника зависит метод, реализующий считывание и конвертирование внешних данных в собственный формат и их загрузку в систему с возможностью дальнейшего сохранения в новом формате. В первоначальной версии системы будут доступны (встроены) конвертеры для наиболее часто используемых форматов внешних данных, при этом также планируется обеспечить возможность добавления в систему собственных функций считывания данных без необходимости модификации ее программного кода и перестройки программного пакета. Источники данных, полученные таким образом, будут считаться пользовательскими.

Предполагается, что пользователь (психолог-экспериментатор) перед работой с системой:

- 1) знает структуру эксперимента (последовательность и условия предъявления стимулов, прохождения испытаний);
- 2) располагает файлами стимулов, использованных в конкретном эксперименте, и результатами этого эксперимента: текстовыми файлами с данными «сырых» траекторий (в собственном формате системы или в некоторых стандартных форматах, для которых в системе существует конвертер) и таблицами значений факторов, характеризующих испытуемых и группы испытаний;
- 3) знает физические свойства стимулов (размеры, продолжительность, форматы) и их характеристики;
- 4) может сопоставить имеющиеся файлы траекторий испытуемым и стимулам, для которых они получены (в случае отсутствия возможности сделать это автоматически средствами конвертера);
- 5) понимает, что если файлы с «сырыми» траекториями не соответствуют стандартным форматам, конвертеры для которых реализованы в системе, то возникает необходимость внешней конвертации этих данных в собственный формат системы.

При выполнении этих условий пользователь может приступить к работе с системой. Дальнейшая работа подразумевает загрузку данных, ввод метаданных, проведение их анализа как с использованием графического интерфейса системы, так и посредством командной строки R, и последующее сохранение/экспорт результатов расчетов. Общая функциональность системы представлена в виде стандартной диаграммы потоков данных на рисунке 2:

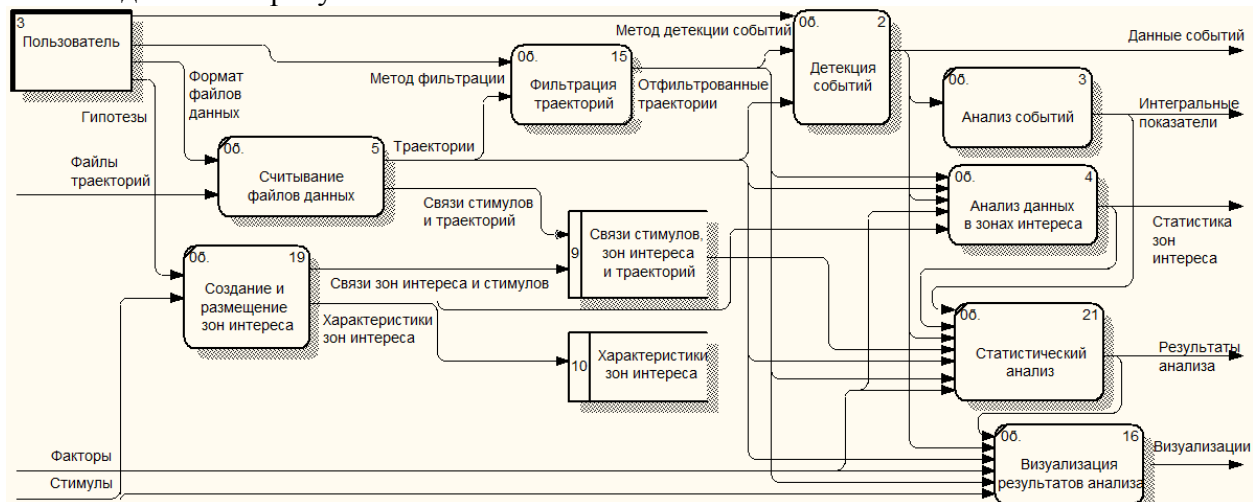


Рисунок 2. Диаграмма потоков данных и общих функций их обработки (DFD, data flow diagram).

Детализация возможностей системы. Поскольку DFD диаграмма не позволяет отразить функциональность разрабатываемой системы в деталях, ниже приводится текстовое описание набора функций, планируемых для реализации в соответствии с техническим заданием, сформулированным совместно с экспериментальными психологами Центра экспериментальной психологии МГППУ:

- 1) импортировать первичные данные («сырые» траектории), представленные в различных распространенных форматах, а также использованный в экспериментах графический стимульный материал и таблицы значений факторов, характеризующих особенности испытуемых, стимулов или испытаний (качественные и количественные оценки релевантных для анализа признаков);
- 2) производить предварительную обработку загруженных данных: фильтрацию, сглаживание выбросов и т.п.;
- 3) выделять на стимульном материале пользовательские зоны интереса или автоматически создавать набор зон интереса в виде регулярной сетки;
- 4) визуализировать первичные и сглаженные/отфильтрованные траектории движений глаз, а также типичные (усредненные) траектории, для заданных экспериментальных ситуаций и стимулов, групп испытуемых, выявленных в результате кластерного анализа или указанных пользователем, а также выделяемых на основе оценок внешних категориальных или порядковых факторов;
- 5) обнаруживать окуломоторные события: фиксации, саккады, глиссады, моргания, следящие движения алгоритмами I-DT (Salvucci, Goldberg, 2000), I-VT (Olsen, 2012), Adaptive I-DT (Nyström, Holmqvist, 2010), I-MST, I-KFG, I-VVT, I-VMP и I-VDT (Komogortsev, 2013) и визуально отображать их временные участки на графиках исходных или сглаженных траекторий;
- 6) рассчитывать традиционные интегральные показатели глазодвигательной активности (интегральная длина пути взора, длительность, продолжительность фиксации, амплитуда, пиковая скорость, ускорение и асимметрия саккады, число фиксаций и саккад, в том числе в различных направлениях и многие другие показатели),
- 7) рассчитывать основные статистики и визуализировать вероятностные распределения значений показателей, проводить статистический анализ по экспериментальным ситуациям, по зонам интереса, по стимулам, по группам испытуемых (например, сравнение среднего времени фиксаций в двух группах испытуемых);
- 8) рассчитывать матрицы вероятностей перехода между заданными зонами интереса или между ячейками регулярной сетки, наложенной на плоскость стимула, оценивать матрицы представления преемника (successor representation matrix, аналог фундаментальной матрицы цепи маркова) для последовательности переходов между заданными зонами интереса (Hayes et al., 2011);
- 9) строить карты распределения внимания (attention map) для заданных экспериментальных ситуаций, выполнять статистический анализ сходства карт распределения внимания;
- 10) задавать гипотетические стратегии посещения зон интереса и рассчитывать степень следования им (Мармалюк, Звонкина, 2012);
- 11) проводить выборочный иерархический кластерный анализ для обнаружения скрытых закономерностей в данных с использованием в качестве исходного набора признаков для построения мер подобия траекторий: а) традиционные интегральные показатели, б) элементы матрицы переходных вероятностей или матрицы представления преемника, в) показатели степени следования пространственным стратегиям переходов между зонами интереса, г) значения внешних факторов; д) статические карты распределения внимания;
- 12) визуализировать результаты кластерного анализа, способствуя выбору наилучшего кластерного решения (варианта разбиения выборки на подгруппы);

13) сохранять исходные данные и все результаты расчетов для повторного использования и возможности переноса.

Оценка минимальных системных требований.

1. Оперативная память: минимум 512 Мб (конкретная рекомендация может быть дана при известном объеме обрабатываемых данных окулографического эксперимента).
2. Частота процессора: 1 ГГц.
3. Операционная система: Mac OS, OS Windows, FreeBSD, Solaris и другие дистрибутивы Unix и Linux.
4. Последняя версия интерпретатора языка R: 3.1.0.

Отличительные особенности разрабатываемой системы. Как упоминалось выше, для разработки системы было решено использовать среду вычислений R для статистической обработки данных и работы с графикой. Преимуществами выбора R для написания системы является, в первую очередь, бесплатность и открытость среды, ее широкая распространенность в научных кругах, позволяющая считать ее стандартным (де-факто) инструментом, используемым для анализа экспериментальных данных. Характерным свойством R является то, что он поддерживает широкий спектр статистических и численных методов и обладает хорошей расширяемостью с помощью пакетов. Пакеты представляют собой библиотеки для работы со специфическими функциями для специальных областей применения. В базовую поставку R включен основной набор пакетов, а всего по состоянию на 2013 год доступно более 4000 пакетов (R – язык программирования, 2014). Все пакеты, претендующие на публикацию в публичном официальном репозитории **CRAN** (Comprehensive R Archive Network) (CRAN, 2014), проходят строгую оценку, рецензирование, стандартизацию и верификацию. Такой подход позволяет удерживать уровень качества компонент среды R на постоянно высоком уровне. Пакеты, удовлетворяющие строгим критериями R-сообщества доступны для загрузки из любой точки мира через сеть Интернет.

Разрабатываемая система для анализа данных айтрекинга будет представлять собой именно такой специализированный пакет, реализующий базовые функции, перечисленные ранее, и расширяемый за счет как создания новых пакетов, совместимых с базовым, так и путем добавления новых объектов и методов для работы с ними в базовую версию.

Еще одной особенностью R, чрезвычайно важной при решении исследовательских (поисковых) задач, являются графические возможности, заключающиеся в создании качественной и разнообразной интерактивной графики на базе трех основных пакетов: **base**, **lattice** и **ggplot2** (Lewin-Koh, 2013).

Система, разработанная с помощью стандартных общепризнанных средств с открытым исходным кодом, способствует облегчению проверки адекватности применяемых методов обработки данных окулографии и корректности их реализации (соответствие научному принципу обоснованности). Бесплатность системы позволит устранить организационные издержки и бюджетные ограничения, возникающие на этапе обработки экспериментальных данных, что, в свою очередь, приведет к оптимизации процесса получения и распространения гуманитарных научных знаний в обществе. Доступность разработанных средств для загрузки с портала, размещенного в сети Интернет, обеспечит возможность перепроверки научных результатов, получаемых с помощью разработанного программного обеспечения (соответствие научному принципу intersubъективной проверяемости), а модульная структура программного обеспечения создаст предпосылки для дальнейшего расширения и развития проекта (соответствие научному принципу прогрессизма). Реализация в рамках одного программного решения нескольких математических подходов к анализу данных окулографии, включая авторские разработки, позволит исследователям перепроверять выявленные закономерности и делать более надежные выводы.

Следует особо отметить, что большинство как традиционных, так и самых современных методов статистики и математического моделирования не потребуют повторной реализации, поскольку доступны в CRAN. Необходимо лишь адаптировать их к специфике данных айтрекинга (путем преобразования «сырых» данных траекторий в различные представления – наборы признаков обрабатываемых траекторий), собрав с помощью отдельных модулей мощную систему анализа.

Однако среда R предоставляет пользователю лишь интерфейс командной строки, что делает проблематичным ее использование неспециалистами в области программирования. Понимая важность обеспечения таких пользователей возможностями R, а также в педагогических целях, представителями R-сообщества были разработаны пакеты для R (Tcl/Tk, RGtk, gWidgets2 и другие), позволяющие создавать графические пользовательские интерфейсы (GUI, graphical user interface), например, такие как **R Commander** (Rcommander, 2013), **RKward** (RKward, 2013), **Deducer** (Deducer, 2013) и многие другие.

К сожалению, настройка существующих GUI для нужд данного проекта не представляется возможной, поскольку все они рассчитаны на работу лишь с данными, представленными в табличном виде, а не со сложными объектами вроде наборов окуломоторных событий, графических стимулов и т.п. Поэтому для создания собственного GUI системы нами планируется использовать пакет **gWidgets2** (Verzani, 2014), что позволит любому экспериментальному психологу проводить анализ собственных данных, опираясь на интуитивно понятный графический интерфейс с элементами диалога, не теряя при этом возможности использовать интерфейс командной строки.

Разработка системы в рамках объектно-ориентированной парадигмы программирования, в которой основными концепциями являются понятия объектов, классов объектов и методов работы с ними. Такой подход позволяет более естественным образом представить специфику области знаний, определить основные свойства классов объектов, таких как, например, траектория взгляда или окуломоторное событие, экземпляры которых суть анализируемые данные, формирующие выборки наблюдений, обладающие особыми специфическими свойствами и допустимыми (осмысленными) методами обработки. В том числе такой подход облегчает обеспечение структурированности и модульности программного кода, что очень важно при необходимости внесения изменений и доработки.

В среде R присутствует возможность сохранения рабочего пространства пользователя (набора активных объектов, содержащих полученные данные, и функций) в виде файла на жестком диске. Эта опция обеспечивает легкость переноса исходных данных, метаданных (например, информации о соответствии данных траекторий конкретным стимулам) и полученных результатов обработки путем копирования единого файла данных, продуцируемого по желанию пользователя в рамках сеанса работы с R. В соответствии с проектным решением, при работе пользователя с системой в целях хранения обрабатываемых данных будет формироваться набор связанных объектов-таблиц, что позволит хранить не только сами данные, но и заданную пользователем информацию о связях между данными, определяющих целостность информации, полученной в рамках эксперимента.

В структуру хранения данных заложены атрибуты, позволяющие в будущем реализовать в системе функции, связанные с анализом данных, зарегистрированных при просмотре видеозаписей или с помощью мобильных установок, а также с работой с нечеткими, распределенными и динамическими зонами интереса (Holmqvist et al., 2011).

Заключение

Выполненный обзор показал, что существует достаточно обширный ряд программных решений задач анализа данных айтрекинга. Среди них можно выделить два основных типа систем: проприетарные и открытые условно-бесплатные или бесплатные. Проприетарные системы обычно используются в коммерческом секторе, в то время как в научной работе предпочтительны именно открытые решения.

Среди открытых решений на данный момент нет систем, отвечающих всем важнейшим критериям, таким как функциональность, кросс-платформенность, наличие пользовательского интерфейса, возможность выполнения полного цикла анализа данных в рамках одной системы. Единые стандарты технологии анализа айтрекинговых данных только начинают формироваться, а каждый год создаются и тестируются новые базовые алгоритмы обнаружения окуломоторных событий и реализуются специфические методы, применяемые в конкретной прикладной области.

Очевидна актуальность развития прикладных информационно-аналитических систем автоматизированного анализа данных окулографического эксперимента как путем формирования новых концептуальных подходов и совершенствования алгоритмов, так и посредством унификации и стандартизации их архитектуры.

Следование принципу открытости, внимание к критике научного сообщества, а также совместные усилия экспериментаторов и опытных разработчиков прикладных систем, несомненно, положительно повлияют на дальнейшее становление окулографического метода исследований.

Предложенная авторами концепция и технический проект (доступен в публичном репозитории (Marmalyuk, 2014)) расширяемой системы, позволяющей выполнять большую часть цикла анализа айтрекинговых данных, послужат основой следующему этапу работы – программной реализации её ядра.

Поддержка

Публикация подготовлена в рамках поддержанного РГНФ научного проекта №14-06-12012 «Программное обеспечение с открытым исходным кодом для анализа результатов окулографических исследований».

Литература

1. SensoMotoric Instruments GmbH [Electronic resource] // SMI BeGaze Eye Tracking Analysis Software, 2014. URL: <http://www.smivision.com/en/gaze-and-eye-tracking-systems/products/begaze-analysis-software.html> (дата обращения 27.06.2014).
2. Caldara R., Miellet S. iMap: A Novel Method for Statistical Fixation Mapping of Eye Movement data // Behavior Research Methods. 2011. V. 43. № 3. P. 864-878.
3. Logacev P., Vasishth S. Em2 [Electronic resource] // CRAN – Package em2, 2013. URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/em2/index.html> (дата обращения 27.06.2014).
4. Verzani J. GWidgets2 [Electronic resource] // CRAN - Package gWidgets2, 2014. URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/gWidgets2/index.html> (дата обращения 27.06.2014).
5. Lewin-Koh N. Graphic Displays & Dynamic Graphics & Graphic Devices & Visualization [Electronic resource] // CRAN Task View, 2013. URL: <http://cran.r-project.org/web/views/Graphics.html> (дата обращения 27.06.2014).
6. Deducer [Electronic resource] // An R Graphical User Interface (GUI) for Everyone, 2013. URL: <http://www.deducer.org/pmwiki/pmwiki.php?n=Main.DeducerManual> (дата обращения 27.06.2014).
7. EyeTracking Inc. [Electronic resource] // EyeTracking Inc. – the eye tracking experts, 2013. URL: <http://www.eyetracking.com> (дата обращения 27.06.2014).

8. Gitelman D.R. ILAB: A program for postexperimental eye movement analysis. // Behavior Research Methods. 2002. V. 34. № 4. P. 605-612.
9. Hope R.M. Gazetools [Electronic resource] // Index. gazetools 4.0.201407071716, 2013. URL: <http://ryanhope.github.io/gazetools/> (дата обращения 10.07.2014).
10. Hayes T.R., Petrov A.A., Sederberg P.B. A novel method for analyzing sequential eye movements reveals strategic influence on Raven's Advanced Progressive Matrices // Journal of Vision. 2011. V. 11. №10. P. 1-11.
11. Eye Tracking: A comprehensive guide to methods and measures / Holmqvist K., Nyström M., Andersson, R., Dewhurst R., Jarodzka H., Weijer J. Oxford University Press, 2011. 560 p.
12. Komogortsev O.V. Komogortsev Oleg's Web Page [Electronic resource] // Eye Movement Classification Software (offline classification), 2013. URL: http://cs.txstate.edu/~ok11/emd_offline.html (дата обращения 10.07.2014).
13. Komogortsev O.V., Gobert D.V., Jayarathna S., Koh D., Gowda S. Standardization of Automated Analyses of Oculomotor Fixation and Saccadic Behaviors // Biomedical Engineering, IEEE Transactions on. V. 57. №11. P. 2635-2645.
14. Komogortsev O.V., Karpov A. Automated Classification and Scoring of Smooth Pursuit Eye Movements in Presence of Fixations and Saccades // Journal of Behavioral Research Methods. 2013. V. 45. №1. P. 1-13.
15. Nyan [Electronic resource] // Nyan[®] - a full-featured eye tracking analysis and presentation tool, 2013. URL: <http://www.interactive-minds.com/eye-tracking-software/nyan> (дата обращения 27.06.2014).
16. Nyström M., Holmqvist K. An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eyetracking data // Behavior Research Methods. 2010. V. 42. №1. P.188-204.
17. Hope R.M. Eyetracking [Electronic resource] // Package “eyetracking”, 2014. URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/eyetracking/eyetracking.pdf> (дата обращения 27.06.2014).
18. Papenmeier F., Huff M. DynAOI: A tool for matching eye-movement data with dynamic areas of interest in animations and movies // Behavior Research Methods. 2010. V. 42. № 1. P. 179-187.
19. Marmalyuk P.A. EyeTracking [Electronic resource]: public repository for the RFH project №14-06-12012, 2014. URL: <https://github.com/PMarmalyuk/EyeTracking> (дата обращения 27.06.2014).
20. Rcommander [Electronic resource]: a graphical interface for R, 2013. URL: <http://www.rcommander.com> (дата обращения 27.06.2014).
21. Salvucci D. D., Goldberg J. H. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols // In Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research and Applications. 2000. P. 71–78.
22. Sogo H. GazeParser: an open-source and multiplatform library for low-cost eye tracking and analysis // Behavior Research Methods. 2013, V. 45. № 3. P. 684-695.
23. CRAN [Electronic resource]: The Comprehensive R Archive Network, 2014. URL: <http://cran.r-project.org> (дата обращения 27.06.2014).
24. Olsen A. Tobii I-VT Fixation Filter [Electronic resource]: Algorithm Description, 2012. URL: <http://www.tobii.com/en/eye-tracking-research/global/library/white-papers/the-tobii-i-vt-fixation-filter> (дата обращения 27.06.2014).
25. Tobii Studio [Electronic resource]: Eye Tracking Software for Analysis, 2013. URL: <http://www.tobii.com/en/eye-tracking-research/global/products/software/tobii-studio-analysis-software> (дата обращения 27.06.2014).
26. Voßkühler A., Nordmeier V., Kuchinke L., Jacobs A.M. OGAMA - OpenGazeAndMouseAnalyzer: Open source software designed to analyze eye and mouse movements in slideshow study designs // Behavior Research Methods. 2008. V. 40, № 4. P. 1150-1162.

27. RKWard [Electronic resource]: Welcome to RKWard, 2013. URL: http://rkward.sourceforge.net/wiki/Main_Page (дата обращения 27.06.2014).
28. West J.M., Haake A.R., Rozanski E.P., Karn, K.S. EyePatterns: software for identifying patterns and similarities across fixation sequences // ETRA, Proceedings of the 2006 symposium on Eye tracking research & applications. 2006, P. 149-154.
29. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Регистрация и анализ направленности взора человека. М.: Институт психологии РАН, 2013. 316 с.
30. Мармалюк П.А., Звонкина О.М. Опорные показатели глазодвигательной активности при прохождении теста Равена и автоматизация их расчета для оценки выраженности релевантных когнитивных стилей // Экспериментальный метод в структуре психологического знания. Матер. Всерос. науч. конф. М.: Институт психологии РАН, 2012. С. 96–101.
31. R – язык программирования [Электронный ресурс] // Википедия, свободная энциклопедия, 2014. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/R_\(язык_программирования\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/R_(язык_программирования)) (дата обращения 27.06.2014).

References Transliteration

Barabanshchikov V.A., Zhegallo A.V. Registratsiya i analiz napravlenosti vzora cheloveka [Registration and analysis of human eye orientation]. М.: Institut psikhologii RAN, 2013. 316 с. (In Russian).

Marmalyuk P.A., Zvonkina O.M. Opornye pokazateli glazodvigatel'noi aktivnosti pri prokhozhenii testa Ravena i avtomatizatsiya ikh rascheta dlya otsenki vyrazhennosti relevantnykh kognitivnykh stilei [Oculomotor activity indicators during Raven test and automation of their calculation to assess the severity of relevant cognitive styles]. Eksperimental'nyi metod v strukture psikhologicheskogo znaniya. Mater. Vseros. nauch. konf. М.: Institut psikhologii RAN, 2012. S. 96–101. (In Russian).

R (yazyk programmirovaniya) [Elektronnyi resurs] // Vikipediya, svobodnaya entsiklopediya [R programming language [Electronic resource] // Wikipedia, the free encyclopedia], 2014. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/R_\(yazyk_programmirovaniya\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/R_(yazyk_programmirovaniya)) (data obrashcheniya 27.06.2014). (In Russian).

Support

This work was supported by the Russian Foundation for Humanities (project №14-06-12012 «Open-source software for oculography data analysis»)