

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ОКУЛОГРАФИЧЕСКОЙ БИОМЕТРИИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО СЕГМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭРГОНОМИКИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Д. А. Костюк¹, А. А. Маркина²

¹ К. т. н., доцент кафедры ЭВМиС, доцент УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

² Преподаватель кафедры ЭВМиС УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

Реферат

Представлен анализ использования окулографии для оценки эффективности человеко-машинного взаимодействия, а также возможные способы применения современных окулографических устройств (айтрекеров) потребительского сегмента для отслеживания направления взгляда пользователя. Приведен обзор особенностей, производительности и ограничений. Предлагается схема эксперимента для изучения взаимодействия пользователя с графическими приложениями в неподдерживаемых операционных системах. Обсуждаются особенности интерпретации и визуализации данных.

Ключевые слова: окулография, человеко-машинное взаимодействие, эргономика.

USING CONSUMER-GRADE OCULOGRAPHIC BIOMETRICS DEVICES IN HUMAN-MACHINE INTERFACE ERGONOMICS STUDIES

D. A. Kostiuk, A. A. Markina

Abstract

The analysis of oculography to evaluate the human-computer interaction efficiency is presented, as well as possible ways of using modern consumer-grade oculographic devices (eye trackers) to track the user's gaze direction. An overview of features, performance, and limitations is given. An experiment scheme is proposed to study user interaction with graphical applications in unsupported operating systems. Data interpretation and visualization specifics is discussed.

Keywords: oculography, human-computer interaction, ergonomics.

Введение

При взаимодействии с современным аппаратным и программным обеспечением зрение часто играет роль основного, а в ряде случаев и единственного канала восприятия информации. При этом четкое и детализированное зрение, обеспечиваемое центральной частью сетчатки, охватывает крайне небольшую площадь, но на него приходится половина процессов обработки информации зрительной коры головного мозга. Соответственно, детализированная информация получается с помощью зрительной выборки и сканирования [1, 2].

Окулографическое исследование подразумевает анализ движения взгляда и зон визуальной фокализации, на которых концентрируется взгляд. Его применение для оценки эффективности человеко-машинного взаимодействия можно разделить на три категории [3]:

- выяснение причин возникших у пользователя затруднений (долгое заполнение формы и др.), в особенности, связанных с заметностью элементов, точками фокуса внимания, ментальной нагрузкой и отвлечениями;
- выявление особенностей поведения пользователей (стратегии визуального поиска, паттерны чтения и сканирования);
- сравнение нескольких дизайнерских решений в совокупности с другими видами тестирования (анкетированием, биометрической оценкой).

Использование окулографических устройств, называемых также айтрекерами, не требует вербализации (нет необходимости, чтобы испытуемые комментировали свои действия), что является преимуществом, т. к. вербализация сама по себе может влиять на поведение пользователей (выдача желаемого результата, завышение собственных оценок и др.) [4, 5]. Окулографические исследования позволяют избежать как подобных искажений, так и трудоёмкого ручного анализа поведения пользователя на видеозаписи, и потому достаточно актуальны при исследовании эргономики графических приложений.

До недавнего времени малая распространённость и высокая стоимость требуемого оборудования ограничивали использование окулографии для оценки эффективности работы человека-оператора. Однако в последнее время на рынке появилось значительное число биометрических устройств, предназначенных потребительского сегмента: в частности, окулографические устройства в данной категории представлены игровыми айтрекерами, выпускаемыми фирмой Tobii [6–8].

Роль провайдеров биометрии при мониторинге состояния человека-оператора для потребительских устройств не является основной, поэтому при выработке приборных подходов к оценке эффективности человеко-машинного взаимодействия необходимо решать задачи и находить нестандартные архитектурные решения, связанные с доступом к измеряемым ими показателям. Однако перечисленные недостатки компенсируются тем, что

подобные устройства обладают приемлемой точностью, пригодны к непрерывному мониторингу, способны передавать данные в персональный компьютер и при этом, благодаря массовому производству, являются более доступными.

Средства окулографического мониторинга

Айтрекеры определяют ориентацию оптической оси глазного яблока и динамику изменения этой ориентации во времени. По принципу действия их можно разделить на три большие группы: устройства на основе механического контакта с глазом, устройства, измеряющие электрические потенциалы на электродах, расположенных вокруг глаз, и устройства на основе бесконтактных оптических методов регистрации движения глаз. Окулографические устройства потребительского сегмента, представленные на рынке, относятся к последней категории.

В целом, данные устройства обычно с меньшей точностью отслеживают движения глаз по сравнению с использованием механического контакта или принципа электроокулографии, а также имеют ряд ограничений (невозможность регистрации движений глаз во время сна и др.). Однако они достаточно эффективны для отслеживания направления взгляда (т. е. нахождения точки пересечения оптической оси глазного яблока и плоскости экрана), а потому востребованы в задачах, требующих сравнительно недорогого оборудования и неинвазивной процедуры эксперимента.

Обычно в айтрекерах данного типа используется отражение инфракрасной подсветки от роговицы глаз для расчета направления на центр глазного яблока и дальнейшего сравнения с координатами центра зрачка, либо отражение от хрусталика глаза (по аналогии с эффектом «красных глаз» на любительских фотографиях).

Айтрекер может закрепляться неподвижно либо монтироваться на голове испытуемого. Айтрекеры потребительского сегмента относятся к первой категории: устройство закрепляется на ноутбуке или корпусе монитора и подключается к компьютеру по шине USB. Подобная схема позволяет не выполнять учёт и компенсацию движения головы испытуемого относительно координат экрана, что приводит к несколько меньшим вычислительным затратам.

Тем не менее, в целом оптическая окулография характеризуется высокими требованиями к вычислительным ресурсам компьютера и пропускной способности шины подключения. Фактически взгляд перемещается быстрыми скачками (*саккадами*) с короткими паузами между ними (*фиксациями*, во время которых зрительный анализатор человеческого мозга получает основное количество информации). Средняя продолжительность фиксаций находится в диапазоне от 200 мс (чтение текста) до 350 мс (изучение статического изображения), а саккада занимает до 200 мс. Поэтому для оптической окулографии решающую роль играет частота кадров, с которой выполняется видеосъемка.

Айтрекеры потребительского сегмента выполняют видеосъемку с частотой от 30 кадров в секунду. В частности, айтрекеры фирмы Tobii работают на следующей частоте кадров: 30 Гц (наиболее ранняя модель, Tobii REX), 70 Гц (Tobii EyeX), 90 Гц (Eye Tracker 4C) и 133 Гц (выпускающийся в настоящий момент Eye Tracker 5). Поскольку более высокая частота обеспечивает регистрацию большего процента движений глаз, профессиональные окулографические устройства характеризуются частотой выше 100 Гц, а для ряда применений, связанных с точным отслеживанием движений глаз, выпускаются модели,

работающие на частоте 300–1000 Гц [9]. Однако для большинства задач, связанных с оценкой человеко-машинного взаимодействия, подобная точность является избыточной.

Существенным ограничением потребительских айтрекеров является список поддерживаемых ими операционных систем (преимущественно Microsoft Windows последних версий). Это, а также высокие системные требования айтрекера к аппаратному обеспечению ПК (зачастую – необходимость наличия шины USB 3.0 и производительного центрального процессора из-за программной обработки видеопотока) накладывают дополнительные ограничения в плане возможностей использования в задачах окулографического исследования. Для преодоления подобных ограничений может использоваться схема измерения, показанная на рисунке 1.

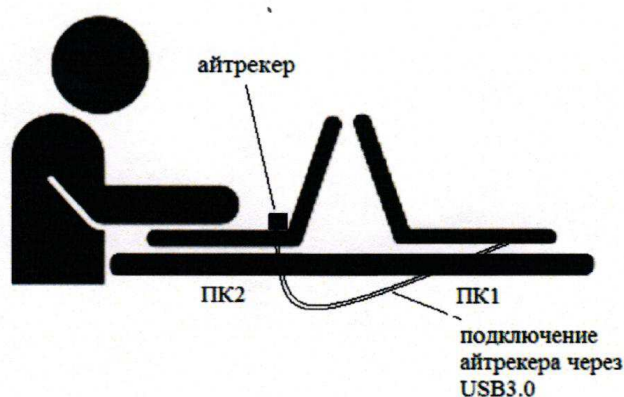


Рисунок 1 – Схема подключения системы для проведения эксперимента

В состав каждого рабочего места экспериментатора в этом случае будут входить два компьютера: ПК1, работающий под управлением MS Windows нужной версии, и ПК2 с поддерживаемой операционной системой (GNU/Linux, Apple macOS и др.) и тестируемым программным обеспечением. Айтрекер закрепляется на корпусе ПК2 таким образом, чтобы распознать лицо оператора, однако электрическое подключение айтрекера выполняется к разъему USB 3.0 ПК1. На ПК1 выполняется калибровка и приём данных, в то время как подопытный находится перед ПК2 и выполняет на нём необходимые тестовые задания. Применяются два ноутбука со схожими параметрами (разрешением экрана). Такая схема предусматривает два посадочных места: для экспериментатора, выполняющего калибровку айтрекера, и подопытного, выполняющего тестовые задания.

Интерпретация данных окулографического мониторинга

При работе с айтрекером данные, полученные от оборудования, должны быть преобразованы в двумерные координаты, соответствующие изображению на дисплее [8]. В одномерном приближении такое линейное отображение между двумя системами координат, т. е. сопоставление значения $x \in [a; b]$ с диапазоном $[c; d]$, может быть описано как

$$x = c + \frac{(x' - a) \cdot (d - c)}{(b - a)} \quad (1)$$

Результатом работы айтрекера является массив координат, соответствующих положению взгляда, в различные моменты времени. При его интерпретации необходимо учитывать разницу между периферическим и центральным зрением. Центральное зрение предоставляет информацию о мел-

ких деталях изображения, но охватывает достаточно малую часть поля зрения. В результате информация поступает с помощью зрительной выборки, а периферическое зрение указывает центральному на следующую точку фокусировки взгляда. В процессе исследований анализируется только центральное зрение, а периферическое не учитывается. Поэтому при интерпретации результатов необходимо избегать «ошибки выжившего»: например, если взгляд часто фиксируется на каких-то элементах управления, это может быть свидетельством не их востребованности и удачного расположения, а ступора при поиске нужного элемента интерфейса.

В общем случае для численной оценки эффективности человеко-машинного взаимодействия могут учитываться такие параметры, как число фиксации, длительность каждой фиксации, время до первой фиксации, длительность первой фиксации, общее число фиксации и число фиксации, происходящих на конкретную зону экрана (рис. 2), а также общее время фиксации.

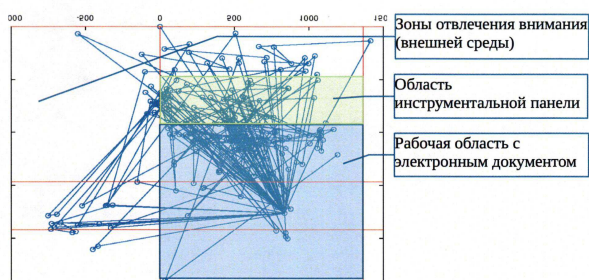


Рисунок 2 – Карта фиксации взгляда с выделением целевых зон

В зависимости от целей исследования и длительности исследуемого интервала рабочего времени оператора для визуализации результатов отслеживания взгляда целесообразно использование следующих двух вариантов:

- построение карты перемещения взгляда во времени;
- построение тепловой карты, подсвечивающей части рабочего окна программы в зависимости от интенсивности фиксации взгляда.

В обоих случаях это предполагает наложение соответствующей карты на изображение, с которым работал пользователь, либо на результат видеопотоколирования.

Для построения карты перемещения взгляда могут использоваться средства отрисовки графов. Этот вариант подходит для изучения особенностей сканирования пользователями рабочей области интерфейса, однако сохраняет наглядность только на коротких фрагментах записи (см. пример на рис. 2).

Поэтому на более долгих временных интервалах целесообразна визуализация распределения фиксации по координатам, соответствующим различным областям экрана, на тепловой карте. Тепловая карта обеспечивает сглаживание данных, позволяя формировать выводы о совокупности на основе конечной выборки. Эффективным математическим аппаратом для визуализации подобного типа является двумерная оценка плотности ядра (KDE, Kernel Density Estimation) [10].

В двумерном случае точки данных представляются векторами $x_1 = [x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1n}]$ и $x_2 = [x_{21}, x_{22}, x_{23}, \dots, x_{2n}]$, где $x_i = (x_{1i}, x_{2i})$ принадлежит двумерному распределению f . Двумерная оценка плотности ядра определяется как

$$\hat{f}(x, H) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_H(x - x_i), \quad (2)$$

где K – некоторая неотрицательная функция, называемая ядром, а $h > 0$ – сглаживающий параметр, известный как ширина окна (bandwidth). Ядро K_H является взвешенным и

определяется как $\frac{1}{H} K(\frac{x}{H})$. Среди часто используемых функций ядра для решаемой задачи хорошо подходит функция Гаусса:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2}x^2) \quad (3)$$

Ширина окна H влияет на точность аппроксимации, и в случае двумерных данных может быть представлена диагональной матрицей

$$H = \begin{bmatrix} h_1^2 & 0 \\ 0 & h_2^2 \end{bmatrix}$$

Пример тепловых карт, построенных с помощью KDE по данным, полученным от потребительских айтрекеров Tobii REX и EyeX, можно наблюдать на рис. 3. На основе тепловых карт выявляется паттерн сканирования информации: в частности, в представленных случаях пользователь быстро просматривает строки с минимальной фокусировкой на них в левой части экрана, а также постоянно фиксирует взгляд на конкретном элементе управления в правой части, регулярно сверяясь с выводимой на нем информацией.

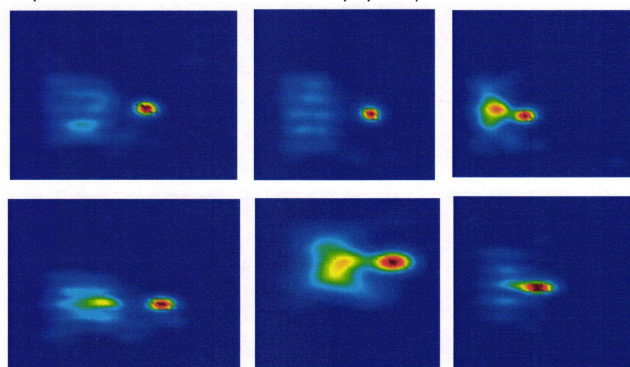


Рисунок 3 – Примеры построенных теплокарт

Список цитированных источников

1. Semmelmann, K. Online webcam-based eye tracking in cognitive science : a first look / K. Semmelmann, S. Weigelt // Behavior Research Methods. – Vol. 50. – 2018. – P. 451–465.
2. Titz, J. Comparing eye trackers by correlating their eye-metric data / J. Titz, A. Scholz, P. Sedlmeier // Behavior Research Methods. – Vol. 50. – 2018. – P. 1853–1863.
3. Дубицкий, А. Применение айтрекеров для юзабилити-исследований ПО в GNU/Linux / А. Дубицкий, Д. Костюк, А. Маркина, С. Фомин // Четырнадцатая конференция разработчиков свободных программ: тезисы докладов – Калуга, 22–24 сентября 2017 г. – М. : Базальт СПО, 2017. – С. 36–41.
4. Arhippainen, L. Empirical evaluation of user experience in two adaptive mobile application prototypes / L. Arhippainen, M. Tähti // Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. Norrköping, Sweden, 10–12 December 2003. – P. 27–34.

5. Mandryk, R. L. Using psychophysiological techniques to measure user experience with entertainment technologies / R. L. Mandryk, K. M. Inkpen, T. W. Calvert // Behaviour & Information Technology, Vol. 25 (2), 2006. – P. 141–158.
 6. Костюк, Д. А. Подход к биометрической оценке эргономики графического интерфейса пользователя / Д. А. Костюк, О. О. Латий, А. А. Маркина // Вестник БрГТУ. – № 5 (101) : Физика, математика, информатика. – 2016. – Брест : Издательство БрГТУ. – С. 46–49.
 7. Gibaldi, A. Evaluation of the Tobii EyeX Eye tracking controller and Matlab toolkit for research / A. Gibaldi [et al.] // Behavior Research Methods, Vol. 49, 2017. – P. 923–946.
 8. Drachen, A. Correlation between heart rate, electrodermal activity and player experience in First-Person Shooter games / A. Drachen [et al.] // Proceedings of the 5th ACM SIGGRAPH Symposium on Video Games. – Los Angeles : CA, 2010. – P. 49–54.
 9. Duchowski, A. Eye Tracking Methodology. Theory and practice. Second edition. – London : Springer, 2007. – 334 p.
 10. Simonoff, J. S. Smoothing Methods in Statistics. – London : Springer, 1996. – 352 p.
- References**
1. Semmelmann, K. Online webcam-based eye tracking in cognitive science : a first look / K. Semmelmann, S. Weigelt // Behavior Research Methods. – Vol. 50. – 2018. – P. 451–465.
 2. Titz, J. Comparing eye trackers by correlating their eye-metric data / J. Titz, A. Scholz, P. Sedlmeier // Behavior Research Methods. – Vol. 50. – 2018. – P. 1853–1863.
 3. Dubickij, A. Primenenie ajtrekerov dlya yuzabiliti-issledovanij PO v GNU/Linux / A. Dubickij, D. Kostyuk, A. Markina, S. Fomin // CHetyrnadcataya konferenciya razrabotchikov svobodnyh programm: tezisy dokladov – Kaluga, 22–24 sentyabrya 2017 g. – M. : Bazal't SPO, 2017. – S. 36–41.
 4. Arhippainen, L. Empirical evaluation of user experience in two adaptive mobile application prototypes / L. Arhippainen, M. Tähti // Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. Norrköping, Sweden, 10–12 December 2003. – P. 27–34.
 5. Mandryk, R. L. Using psychophysiological techniques to measure user experience with entertainment technologies / R. L. Mandryk, K. M. Inkpen, T. W. Calvert // Behaviour & Information Technology. – Vol. 25 (2). – 2006. – P. 141–158.
 6. Kostyuk, D. A. Podhod k biometricheskoj ocenke ergonomiki graficheskogo interfejsa pol'zovatelya / D. A. Kostyuk, O. O. Latij, A. A. Markina // Vestnik BrGTU. – № 5 (101) : Fizika, matematika, informatika. – 2016. – Brest: Izdatel'stvo BrGTU. – S. 46–49.
 7. Gibaldi, A. Evaluation of the Tobii EyeX Eye tracking controller and Matlab toolkit for research / A. Gibaldi [et al.] // Behavior Research Methods. – Vol. 49. – 2017. – P. 923–946.
 8. Drachen, A. Correlation between heart rate, electrodermal activity and player experience in First-Person Shooter games / A. Drachen [et al.] // Proceedings of the 5th ACM SIGGRAPH Symposium on Video Games. – Los Angeles : CA, 2010. – P. 49–54.
 9. Duchowski, A. Eye Tracking Methodology. Theory and practice. Second edition. – London : Springer, 2007. – 334p.
 10. Simonoff, J. S. Smoothing Methods in Statistics. – London: Springer, 1996. – 352 p.

Материал поступил в редакцию 18.01.2021