

А. В. Щербаков¹, Д. А. Баловнев¹, Г. Г. Знайко¹

¹ ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИДЕООКУЛОГРАФОВ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАТОРА ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Предложена методика определения точностных характеристик видеоокулографов, и реализована экспериментальная установка на основе имитатора глаза человека. Обоснована целесообразность применения предлагаемой методики при оценке прецизионности и порога чувствительности (разрешения видеоокулографов), а также определены границы ее применимости. Показано, что основным преимуществом использования имитатора глаза для оценки точностных характеристик видеоокулографов является тот факт, что фиксированные угловые положения можно задавать многократно с большой точностью. При помощи разработанной установки произведено исследование характеристик прототипа носимого видеоокулографа, и определены его прецизионность и порог чувствительности. Результаты настоящего исследования демонстрируют, что разработанная экспериментальная установка может быть полезной для оценки характеристик видеоокулографов в промышленных и исследовательских приложениях.

Ключевые слова: видеоокулография, айтрекинг, точность, прецизионность, разрешение видеоокулографов.

Введение

За последние 20 лет произошло значительное увеличение количества исследований, использующих технологию видеоокулографии [1, 2]. Быстрое продвижение в этой области произошло в результате развития программных и аппаратных средств, существенно облегчивших разработку видеоокулографов [3]. В настоящее время видеоокулографы используются в широком спектре профессиональных и пользовательских приложений [1–5].

Несмотря на развитие видеоокулографии, в литературе незаслуженно мало уделено внимания разработке инструментов и методов для оценки точности видеоокулографов. Традиционно для проверки качества данных видеоокулографов разработчики и исследователи прибегали к помощи испытателей. Однако при оценке погрешности возникала проблема, заключающаяся в том, что данная процедура основана на предположении, что испытатели гарантированно фиксируют взгляд на цели. Это предположение неверно, поскольку человек имеет ограниченный контроль над точностью удержания своего взгляда [5–13].

В связи с этим в ряде случаев для проверки качества данных видеоокулографов представляется целесообразным использовать имитатор глаза человека, т.к. при этом появляется возможность задавать углы направления взгляда с необходимой

точностью и удерживать заданный угол постоянным долгое время [6].

Целью настоящей работы является реализация методики объективной оценки точностных характеристик видеоокулографов с помощью имитатора глаза человека. Основное внимание уделяется оценке таких точностных характеристик, как прецизионность и порог чувствительности.

Методы измерения точностных характеристик видеоокулографов

Видеоокулографический программно-аппаратный комплекс (видеоокулограф, видеоокулографический интерфейс, айтрекер, eye-tracker) – это прибор, позволяющий определять углы вектора направления взгляда человека. Несмотря на то, что выходными данными видеоокулографов, работающих с дисплеями, как правило, являются координаты точки дисплея, на которую направлено внимание пользователя, значения координат связаны с углами вектора направления взгляда геометрическими соотношениями и определяются как точка пересечения вектора направления взгляда с плоскостью дисплея [3].

При оценке точностных характеристик видеоокулографических интерфейсов необходимо различать такие характеристики, как погрешность (accuracy) и прецизионность (precision) [6]. Погрешность видеоокулографа определяется как средняя разница

между измеренным и истинным значениями при повторном измерении значений углов направления взгляда. Прецизионность видеоокулографа, также называемая воспроизводимостью или повторяемостью, представляет собой степень близости друг к другу независимых результатов измерений значений углов направления взгляда, полученных в конкретных условиях, задаваемых в процессе калибровки. Как видно из рис. 1 [6], иллюстрирующего разницу между погрешностью и прецизионностью, существуют два принципиально разных типа ошибок, которые характеризуют измеренные значения относительно истинного.

В частности, при измерении с помощью прибора А нормально распределенная случайная ошибка приводит к большей дисперсии, чем при измерении с помощью прибора В, что свидетельствует о меньшей прецизионности прибора А. Однако при сравнении среднего значения двух распределений с истинным значением ясно, что распределение, соответствующее прибору В, имеет более высокую погрешность, чем распределение, соответствующее прибору А. График В смещен вправо за счет систематической ошибки, которая больше по величине, чем разброс. Такая ошибка, как правило, вызвана неправильной калибровкой видеоокулографа.

Погрешность видеоокулографа, указываемая производителями, учитывает как случайную и систематическую погрешности видеоокулографа, так и влияние пользователя, например окуломоторный шум. Данная характеристика, несмотря на ее полезность и наглядность для пользователя, является обобщенной эксплуатационной характеристикой калиброванного программно-аппаратного видеоокулографического комплекса и сильно зависит от реализованных программных методов калибровки видеоокулографа, а также методов исключения прогрессирующих (например, связанных с постепенным изменением внешних условий) и грубых погрешностей (например, связанных с возникновением случайных бликов). Погрешность видеоокулографа, как правило, определяется в ходе большого количества экспериментов при участии различных пользователей и одновременном использовании эталонного калиброванного окулографа, предоставляющего с высокой точностью данные о значениях углов вектора направления взгляда испытуемого. Погрешность определяется как разница между показаниями тестируемого видеоокулографа и эталонного окулографа [6].

Применение имитаторов глаза человека при определении погрешности видеоокулографов ограничено в связи с тем, что создание универсального имитатора, полностью воспроизводящего геометрию, отражающие способности, диапазон

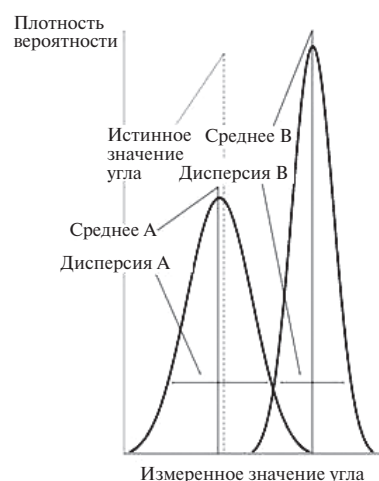


Рисунок 1. Иллюстрация повторного измерения единственного истинного значения двумя различными инструментами: прибор А имеет большую точность, но меньшую прецизионность, чем прибор В

и характер движения человеческого глаза (включая окуломоторный шум), является достаточно сложной задачей [6, 8]. Различие цвета и формы глаз различных пользователей вызывает необходимость создания наборов имитаторов глаза человека с различными характеристиками. Вышеуказанные проблемы делают невозможной калибровку видеоокулографа с помощью имитатора глаза, поэтому зарубежные авторы выполняли ее на реальном пользователе, после чего проводили испытания видеоокулографа с помощью имитатора глаза человека [8]. Такой подход не является полностью корректным и может вызывать возникновение неучтенной систематической погрешности из-за отличия условий, в которых проводятся испытания, от условий, в которых выполнялась калибровка.

Прецизионность видеоокулографа характеризует случайную погрешность, которая не может быть устранена за счет калибровки. Данная характеристика полезна для разработчиков при оценке погрешностей аппаратной части видеоокулографа и программных блоков, реализующих функцию машинного зрения для распознавания и определения положения бликов ИК-подсветки, а также при определении предельных точностных характеристик видеоокулографического комплекса с целью последующей оценки эффективности реализованных калибровочных методов. Необходимое условие при измерении прецизионности видеоокулографа – это неизменность направления взгляда, что делает практически невозможным использование пользователей для проведения данных измерений и требует применения имитаторов глаза человека [6].

Эксперимент заключается в проведении множества измерений значений угла в различных фиксированных угловых положениях имитатора глаза и вычислении разброса измеренных видеоокулографом значений в каждом положении имитатора. Данные измерения являются относительными, не несут информации об абсолютном угловом значении положения имитатора глаза относительно глобальной системы координат и поэтому могут быть выражены как в произвольных единицах (например, в пикселях), так и в угловых градусах (при проведении соответствующего пересчета произвольных единиц в угловые градусы с учетом геометрии системы «видеоокулограф – имитатор глаза»).

Порог чувствительности видеоокулографа (разрешение видеоокулографа) – это наименьшее

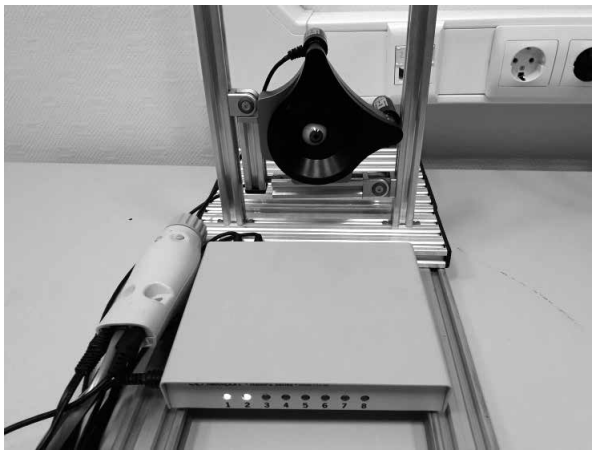


Рисунок 2. Внешний вид экспериментальной установки с имитатором глаза человека

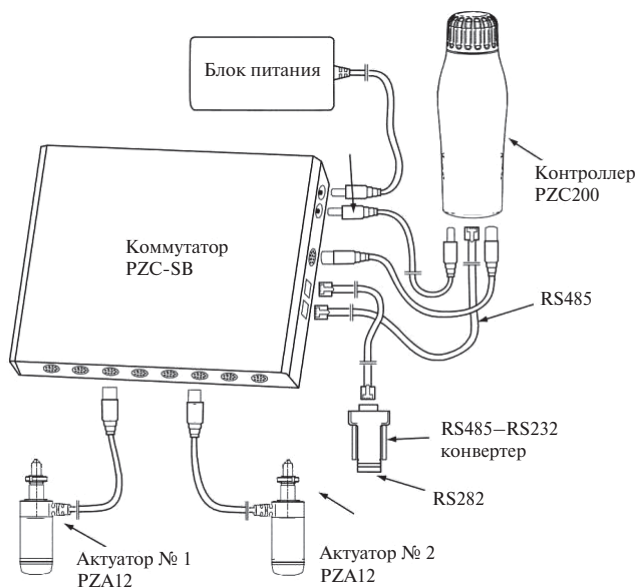


Рисунок 3. Схема включения актуаторов в схему управления

изменение значения угла направления взгляда, способное вызвать заметное изменение показаний видеоокулографа, которое можно обнаружить с заданной доверительной вероятностью. Величина порога чувствительности, как правило, не указывается производителями, но при разработке должна регламентироваться независимо от погрешности показаний прибора. Выполнить измерение порога чувствительности видеоокулографа также возможно только при помощи имитатора глаза человека.

Эксперимент состоит в последовательных малых изменениях углового положения имитатора глаза при помощи высокоточного привода, построении графика зависимости выходных показаний от текущего положения имитатора глаза и последующего определения минимального изменения углового положения имитатора глаза, вызывающего изменение показателей видеоокулографа. Так как данные измерения также являются относительными, то порог чувствительности может быть выражен как в угловых градусах, так и в произвольных единицах.

Экспериментальная часть

Установка, используемая в данном исследовании, представлена на рис. 2. Для обеспечения высокой точности установки угла и неподвижности центра вращения имитатора глаза в качестве движущейся платформы использовался оптомеханический карданов подвес от фирмы Newport U-200G (с диапазоном изменения углов $\pm 4^\circ$) и прецизионными пьезоэлектрическими шаговыми линейными актуаторами PZA12 (с минимальным линейным перемещением 0,16 мкм/шаг). Однако при управлении двигателями следует учитывать, что управляющая электроника контроллера разделяет один шаг на 16 микрошагов, на каждый из которых приходится в среднем примерно 10 нм. Именно это значение величины шага необходимо использовать при пересчете количества шагов актуатора в линейное перемещение [14]. В качестве имитатора глаза человека использовался двустенный глазной протез диаметром 25 мм, закрепляемый в оправе карданова подвеса.

Схема управления также реализована на базе оборудования Newport и включает контроллер, коммутатор и конвертер интерфейса RS485 – RS232 (рис. 3). Контроллер подключался к ПК через последовательный порт RS232 и управлялся посредством пользовательской программы, реализованной в среде MATLAB.

Для определения точностных характеристик видеоокулографа в качестве контролируемых параметров использовались координаты изображений бликов от двух ИК-светодиодов видеоокулографа, т.к. именно эти параметры используются во всех современных видеоокулографах для точного определения вектора направления взгляда.

Блики, возникающие при отражении лучей ИК-светодиодов от роговицы глаза человека, в нашем случае образуются за счет отражения от поверхности имитатора глаза (рис. 4).

В качестве тестируемого видеоокулографа был использован прототип разрабатываемого устройства для регистрации движения глаз при управлении курсором дисплея дополненной реальности. Прототип был реализован на базе компактных камерных модулей с разрешением 800×600 (1600×1200 в режиме интерполяции) и дисплеев дополненной реальности Epson Moverio BT200.

Для исследования видеоокулограф закреплялся на раме установки (рис. 5) так, чтобы обеспечивалось расстояние от камерного модуля до поверхности имитатора глаза $S = 2$ см, т.к. это расстояние является рекомендуемым для максимально точной работы данного прототипа.

Эксперимент состоял в последовательном изменении углового положения имитатора глаза в одной из плоскостей и регистрации координат средней точки между двумя бликами ($X_{avr} = (X_1 + X_2)/2$) в каждом угловом положении. Шаг перемещения составлял 1000 микрошагов актуатора, что соответствовало 0,008 угловым градусам. Диапазон углового перемещения равен 8 угловым градусам. На рис. 6 приведен график зависимости пиксельной координаты X средней точки между двумя бликами от углового положения имитатора глаза, выраженного в количестве шагов актуатора.

Для определения прецизионности необходимо измерить погрешность определения координаты в каждом угловом положении. Из графика (рис. 6)

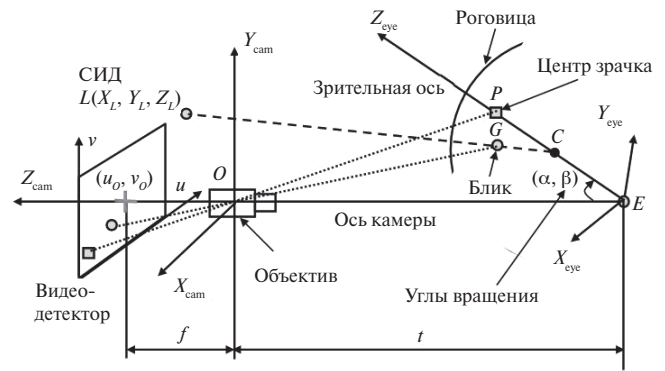


Рисунок 4. Схема системы формирования изображения бликов

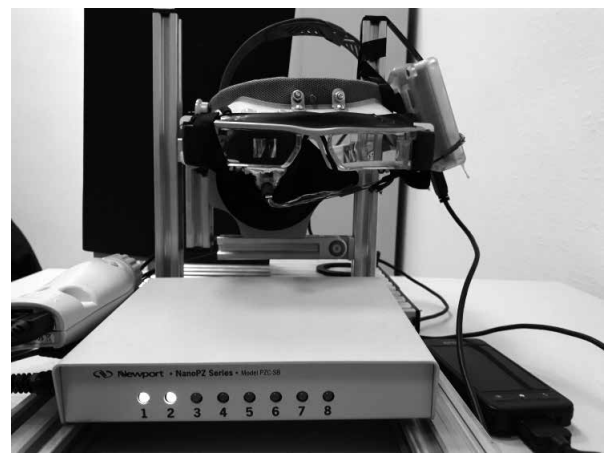


Рисунок 5. Испытания прототипа видеоокулографа при помощи имитатора глаза человека

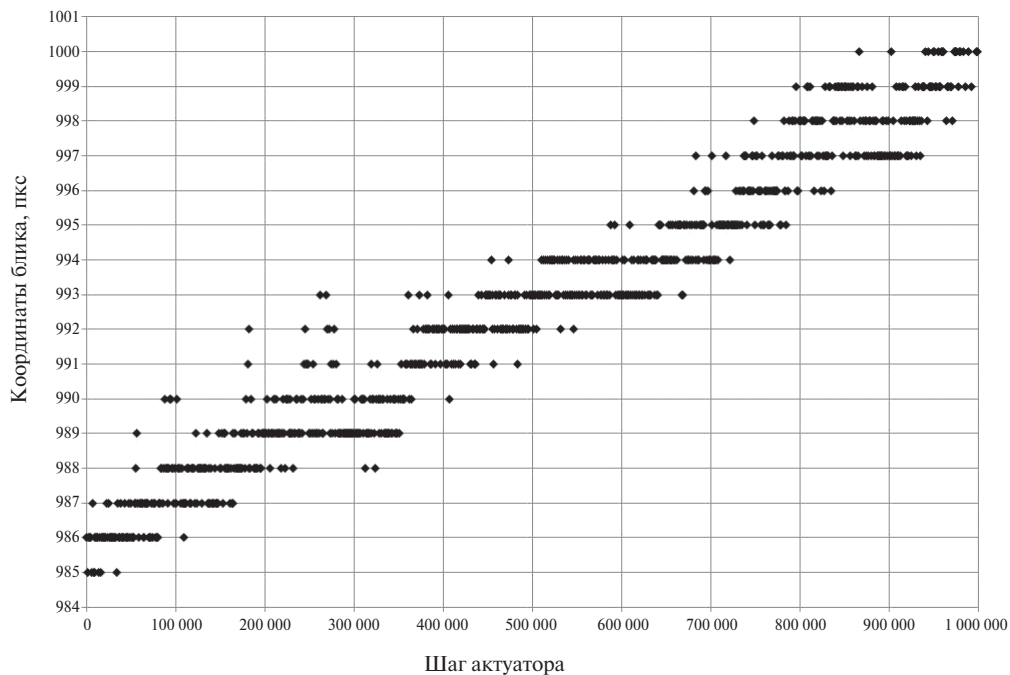


Рисунок 6. График зависимости пиксельной координаты X средней точки между двумя бликами от углового положения имитатора глаза, выраженного в количестве шагов актуатора

получаем величину погрешности координаты блика ± 1 пиксель, что при размере пикселя 2 мкм соответствует отрезку $M_0 = 4$ мкм. Расстояние от задней фокальной плоскости объектива до светочувствительной матрицы вычисляем по формуле [15]

$$S_0 = \frac{fS}{S-f} = \frac{3,8 \cdot 20}{20-3,8} \approx 4,7 \text{ мм},$$

где f – фокусное расстояние объектива; S – расстояние от камерного модуля до поверхности имитатора глаза.

Тогда размер изображения этого отрезка в предметной плоскости

$$M = M_0 S / S_0 \approx 17 \text{ мкм}.$$

Данный отрезок соответствует угловой погрешности, которая при радиусе вращения, равном радиусу имитатора глаза $r = 12,5$ мм, составляет

$$\theta = \arcsin \frac{M}{r} = 0,078^\circ.$$

Для того чтобы оценить порог чувствительности, необходимо определить среднюю длину «ступени», равной половине хода актуатора, при котором данное значение координаты остается неизменным в пределах погрешности, определяемой прецизионностью видеоокулографа и равной ± 1 пикселей. Из графика получаем среднюю длину хода актуатора – 185 000 шагов. Тогда, учитывая, что для пересчета в линейное перемещение шаг двигателя принимается

равным 10 нм [14], получаем среднюю длину «ступени» – 925 мкм, что для данной вращающейся платформы соответствует угловому смещению 0,74.

Таким образом, для данного прототипа видеоокулографа прецизионность определения угла составляет 0,078, а чувствительность (разрешение) – 0,74.

Выводы

В работе предложена методика определения таких точностных характеристик видеоокулографов, как прецизионность и порог чувствительности (разрешение) при помощи имитатора глаза человека. Реализована автоматизированная экспериментальная установка, использующая точную механику, работающую под управлением ЭВМ, для углового позиционирования в двух плоскостях, и двустенный глазной протез для имитации отражающей поверхности человеческого глаза. Проведено испытание работы экспериментальной установки, в ходе которого были получены точностные характеристики прототипа устройства определения направления взгляда. Предложенная экспериментальная установка и метод позволяют определять прецизионность и порог чувствительности видеоокулографов любых существующих на данный момент типов. В дальнейшем разработанная экспериментальная установка может использоваться как для экспериментальных исследований, так и для проведения промышленных испытаний видеоокулографов и контроля их параметров при изготовлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 1998, no. 124, pp. 372–422.
2. Jacob R., Karn K. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In: R. Radach, J. Hyona, & H. Deubel, eds. *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Amsterdam, Elsevier, 2003, pp. 573–605.
3. Majaranta P., Aoki H., Donegan M. et al. *Gaze Interaction and Application of eye Tracking: Advanced in Assistive Technologies*. IGI Global, 2012, 378 p.
4. Van der Geest J.N., Frens M.A. Recording eye movements with video-oculography and sclera search coils: A direct comparison of two methods. *Journal of Neuroscience Methods*, 2002, no. 114, pp. 185–195.
5. McConkie G.W. Evaluating and reporting data quality in eye movement research. *Behavior Research Methods and Instrumentation*, 1981, no. 13, pp. 97–106.
6. Reingold E.M. Eye tracking research and technology: Towards objective measurement of data quality. *Visual Cognition*, 2014, vol. 22, no. 3–4, pp. 635–652.
7. Wass S.V., Forssman L., Leppänen J. Robustness and Precision: How Data Quality May Influence Key Dependent Variables in Infant Eye-Tracker Analyses. *Infancy*, 2014, no. 19 (5), pp. 427–460.
8. Holmqvist K., Nyström M., Mulvey F. Eye tracker data quality: what it is and how to measure it. *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications*, 2012, pp. 45–52.
9. Ooms K., Dupont L., Lapon L., Popelka S. Evaluation of the accuracy and precision of a low-cost eye tracking device. *Journal of Eye Movement Research*, 2015, no. 8 (1), pp. 1–24.
10. Holmqvist K., Nyström M., Andersson R. *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press, 2011, 560 p.
11. Hornof A., Halverston T. Cleaning up systematic error in eye-tracking data by using required fixation locations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, vol. 34 (4), 2002, pp. 592–604.
12. Johnsson J., Matos R. Accuracy and precision test method for remote eye trackers. Sweden, Tobii Technology, 2011, 28 p.
13. Komogortsev O.V., Gobert D.S., Koh S. Standardization of automated analyses of oculomotor fixation and saccadic behaviors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 2635–2645.
14. Nano PZ Ultra-High Resolution Motion System, User's Manual, Irvine, Newport corp., 2006, 55 p.
15. Loshin D.S. *The geometrical optics workbook*. London, UK: Butterworth-Heinemann, 1991, 199 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щербаков Александр Вячеславович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (985) 136-65-99, e-mail: scherbakov_a@ineum.ru.

Баловнев Дмитрий Андреевич, начальник отдела, ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (916) 534-09-31, e-mail: balovnev_d@ineum.ru.

Знайко Геннадий Григорьевич, к.т.н., зам. генерального директора, ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (495) 455-84-93, e-mail: znayko_g@ineum.ru.

For citation: Shcherbakov A. V., Balovnev D. A., Znayko G. G. Determination of accuracy characteristics of video oculographs by using of the human eye imitator. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 2, pp. 106–111.

A. V. Shcherbakov, D. A. Balovnev, G. G. Znayko

DETERMINATION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF VIDEO OCCULOGRAPHS BY USING OF THE HUMAN EYE IMITATOR

A method for determining the accuracy characteristics of video oculographs (eye trackers) is proposed and an experimental setup based on the human eye simulator is implemented. The expediency of using the proposed technique for estimation the precision and threshold of sensitivity (resolution) is justified and the limits of its applicability are determined. It is shown that the main advantage of using the eye simulator for estimation the accuracy characteristics of video oculographs is the fact that fixed angular positions can be set repeatedly with high accuracy. The characteristics of the prototype of the wearable video oculograph have been studied by using of the developed experimental setup and its precision and resolution have been determined. The results of this study demonstrate that proposed method and developed experimental setup may be useful for estimation the characteristics of video oculographs for industrial and research applications.

Keywords: video oculography, eye tracking, accuracy, precision, eye tracker resolution.

REFERENCES

1. Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 1998, no. 124, pp. 372–422.
2. Jacob R., Karn K. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In: R. Radach, J. Hyona, & H. Deubel, eds. *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Amsterdam, Elsevier, 2003, pp. 573–605.
3. Majaranta P., Aoki H., Donegan M. et al. Gaze Interaction and Application of eye Tracking: Advanced in Assistive Technologies. IGI Global, 2012, 378 p.
4. Van der Geest J.N., Frens M.A. Recording eye movements with video oculography and sclera search coils: A direct comparison of two methods. *Journal of Neuroscience Methods*, 2002, no. 114, pp. 185–195.
5. McConkie G.W. Evaluating and reporting data quality in eye movement research. *Behavior Research Methods and Instrumentation*, 1981, no. 13, pp. 97–106.
6. Reingold E.M. Eye tracking research and technology: Towards objective measurement of data quality. *Visual Cognition*, 2014, vol. 22, no. 3–4, pp. 635–652.
7. Wass S. V., Forssman L., Leppänen J. Robustness and Precision: How Data Quality May Influence Key Dependent Variables in Infant Eye-Tracker Analyses. *Infancy*, 2014, no. 19 (5), pp. 427–460.
8. Holmqvist K., Nyström M., Mulvey F. Eye tracker data quality: what it is and how to measure it. *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications*, 2012, pp. 45–52.
9. Ooms K., Dupont L., Lapon L., Popelka S. Evaluation of the accuracy and precision of a low-cost eye tracking device. *Journal of Eye Movement Research*, 2015, no. 8 (1), pp. 1–24.
10. Holmqvist K., Nyström M., Andersson R. Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. Oxford, Oxford University Press, 2011, 560 p.
11. Hornof A., Halverston T. Cleaning up systematic error in eye-tracking data by using required fixation locations. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, vol. 34 (4), 2002, pp. 592–604.
12. Johnsson J., Matos R. Accuracy and precision test method for remote eye trackers. Sweden, Tobii Technology, 2011, 28 p.
13. Komogortsev O.V., Gobert D.S., Koh S. Standardization of automated analyses of oculomotor fixation and saccadic behaviors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 2635–2645.
14. Nano PZ Ultra-High Resolution Motion System, User's Manual, Irvine, Newport corp., 2006, 55 p.
15. Loshin D.S. The geometrical optics workbook. London, UK, Butterworth-Heinemann, 1991, 199 p.

AUTHORS

Shcherbakov Aleksandr, PhD, senior researcher, PJSC Brook INEUM, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: +7 (985) 136-65-99, e-mail: scherbakov_a@ineum.ru.

Balovnev Dmitriy, head of Department, PJSC Brook INEUM, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: +7 (916) 534-09-31, e-mail: balovnev_d@ineum.ru.

Znayko Gennadiy, PhD, deputy general director, PJSC Brook INEUM, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: +7 (499) 135-53-56, e-mail: znayko_g@ineum.ru.