



DOI: [10.71167/uaceg.2025.580106](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.580106)

Получена: 21.10.2024 г.

Приета: 11.11.2024 г.

НАПРЕДЪК В СИСТЕМИТЕ ЗА ПРОСЛЕДЯВАНЕ НА ПОГЛЕДА И ТЯХНАТА РОЛЯ В КАРТОГРАФИЯТА

Н. Николова¹

Ключови думи: когнитивни процеси, сакади, фиксация, следене на погледа, алгоритми, картография

РЕЗЮМЕ

Технологията за проследяване на погледа е една от най-популярните техники за взаимодействие между човек и компютър. Основната функция на тази технология е базирана на устройство, което проследява движението на зеницата, за да идентифицира позиция или да сканира дисплей.

В момента устройствата за проследяване на очите стават все по-евтини, което ги прави достъпен ресурс за изследвания.

Тази статия разглежда напредъка в развитието на системите за следене на погледа с приложение конкретно за нуждите на картографията. Целта на изследването е да предостави систематичен преглед на историческото технологично подобрене в тези системи, като анализира техните предимства и ограничения в контекста на картографските приложения.

Освен това статията представя и технологии в последващата обработка на измерванията на погледа. Оценява се точността и ефективността им за постигане на подобро разбиране на визуалните възприятия на потребителите, както и на алгоритмите за разсейване на фикции и сакади.

1. Въведение

Следенето на очите принадлежи към групата на методите за оценка, наречени изследвания на използваемостта (Usability Studies). Терминът използваемост се дефинира като „ефективността, ефективността и удовлетвореността, с които определени

¹ Николета Николова, докторант, кат. „Фотограметрия и картография“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: nnikolova_fgs@abv.bg

потребители постигат определени цели в конкретни среди“ [1]. Използваемостта може да разкрие качества на продукта, както и липса на неговата функционалност, което обикновено възниква по време на фазата на проектиране на картографския продукт.

Технологията за проследяване на погледа е един от най-иновативните и широко разпространени методи в областта на взаимодействието между човек и компютър (Human-computer interaction). Основната функция на тази технология е базирана на устройство, което проследява движението на зеницата, за да идентифицира насочеността на погледа на потребителя основно върху дисплея. Проследяването на погледа позволява детайлно разбиране на начина, по който потребителите възприемат визуална информация.

В момента устройствата за проследяване на очите стават все по-евтини, което ги прави достъпен ресурс за изследвания. В контекста на картографията тези технологии могат да бъдат използвани за анализ на потребителското поведение при взаимодействие с геопространствени данни, както и за подобряване на визуализацията на картографските продукти. Настоящото изследване ще разгледа класификацията на съществуващите системи за следене на погледа, като ще обърне внимание на техните приложения в областта на картографията.

2. История на системите за проследяване на погледа

В ранните години на развитието на областта на проследяване на погледа движението на очите се е изучавало главно за наблюдение на характера на човешките движения на очите, а не за използването на тези движения за комуникация.

Първите устройства за проследяване на очите, които предоставят обективни и точни данни, се появяват в началото на 20-и век. През 1901 година се правят първите измервания на движението на очите, чрез използване на фотографски метод и светлинни отражения от роговицата на окото и по-късно през 1935 година. В миналото този метод често е бил скъп поради разходите за оборудване и времето, необходимо за анализ на огромното количество записани данни. Някои автори от този период заключават, че не може да се научи много от данните за проследяване на очите.

В края на 1960-те години важноста на записите на движенията на очите – и тяхната визуализация – е илюстрирана в книгата [2]. Поради, от една страна, подобренията на самите системи за проследяване на очите (ставащи по-лесни за работа, и по-надеждни), и напредъка в свързаните психологически теории, от друга страна. Картографите започват да използват проследяване на погледа в своите изследвания през началото на 70-те години, когато Jenks включва движения на очите в своите изследвания на потребители [3, 4]. Последователно се наблюдава увеличаване на изследванията с проследяване на очите в научната област.

През 1980-те години, проследяването на очите е интегрирано в изследванията относно човеко-компютърното взаимодействие (HCI). Това включва проучвания на потребители за откриване и оценка на проблемите във взаимодействията между хора и компютри (например инженерство на използваемостта). Проследяването на очите се използва и в реално време като входно устройство. През 1990-те години компютърните системи стават по-интерактивни с появата на Интернет, уебсайтове, имейли и видеоконференции [5 – 7].

През последните десетилетия, проследяването на погледа продължава да се развива и да намира все по-широко приложение в различни области, сред които и картографията.

2.1. Области на приложение

Експериментите с проследяване на погледа намират приложение в множество изследователски области. Сред тях се открояват най-много следните професионални направления:

- в образованието [8],
- индустриалния дизайн [9],
- картографията [10],
- изследванията на ландшафта [11],
- маркетинга [12],
- спорта [13],
- транспортната инфраструктура [14].

В настоящата статия ще се разгледа конкретното приложение на известни техники за следене на погледа с приложение в уеб картографията и геоинформационните системи.

3. Системи за следене на погледа в картографията

Проследяването на погледа е един от най-точните и красноречиви методи за изучаване на поведението на очите, което се проявява по време на четене на карти, тъй като предоставя обективно измерване на визуалните стратегии, използвани от читателите на карти. С помощта на проследяване на погледа е възможно да се събере информация, която е недостъпна с други техники, особено когато информацията за поведението на хората при решаване на задачи е трудна за наблюдение с други методи. Движението на очите, според Çöltekin и др. [15], предоставя прозрения, които могат да подобрят разбирането на начина, по който хората взаимодействат с интерактивни картографски интерфейси. Картите като визуални стимули се променят от началото на изследванията на движенията на очите в картографията и преминават от статични към динамични дисплеи. В посочената статия Słomska [16] се изследват типовете стимули, използвани в картографски емпирични изследвания. Според анализа на повече от сто статии, Słomska открива, че над една трета от използваните стимули са интерактивни. Освен това нейното изследване показва стабилно увеличаване на броя на публикуваните статии в областта на когнитивната картография. Подобни резултати са предоставени и в областта на проследяването на погледа в картографията от Krassanakis и Cybulski [17]. Прегледната статия на авторите предоставя преглед на съществуващите изследвания с проследяване на очите, които са се появили в картографските изследвания през последното десетилетие. Рецензията показва, че картографите използват проследяване на погледа основно при оценката на картографската символизация и принципите на дизайна. По-нови проучвания, използващи проследяване на погледа в картографията, са фокусирани върху оценката на картографските принципи, интерактивни карти, дисплеи с множество малки карти, графични данни, разликите между експерти и новаци, картова несигурност, 3D визуализация на карти и цветови схеми.

През 2019 г. Ungau и Gray [18] представят изчерпателен литературен преглед на изследванията на използваемостта в областта на географските информационни системи. Анализът на движенията на очите е една от препоръчаните методики.

3.1. Системите за проследяване на погледа с ниска стойност

Системите за проследяване на погледа с ниска стойност използват технологии за мониторинг и анализ на движенията на очите, които са достъпни и на по-ниска цена, но предлагат ограничена точност и функционалности в сравнение с по-скъпите професионални системи. Те могат да се използват в разнообразни области.

Все повече зачестяват изследвания, които са свързани с приложенията на проследяването на очите с ниска стойност. В статия на преподавателите от тайландски университет по информатика Veerawan Janthanasub и Phayung Meesad [19] се оценява представянето на три независими устройства за проследяване на очите с ниска стойност: GP3 на Gazerpoint, EyeTribe и DIY (Направи си сам). Оценката на производителността използва задача, при която потребителят трябва да търси и избира с поглед за промяна на фоновия цвят на кръгло меню, където опциите са подредени в кръг, съобразено със стандарти за компютърни указателни устройства ISO 9241-9 [20]. Резултатите показват, че пространствената точност и скоростта са добър показател за проследяване на целеви грешки, време за изпълнение и производителност. В резултат на това експериментът показва, че всички устройства могат да бъдат потенциално ценен ресурс за изследвания в областта на взаимодействието между човека и компютъра. Освен това, тези евтини и често малки устройства имат редица други предимства в сравнение с решенията на традиционните доставчици на уреди за проследяване на очите (като SMI, SR Research, Tobii и други).

Сред най-големите предимства на тези устройства са:

- Мобилност: малките уреди за проследяване на очите са много по-лесни за транспортиране. Могат да бъдат тествани повече участници извън лабораторията, на удобно за тях местоположение.

- Използване на множество устройства: поради ограничените си разходи, може да се закупят множество уреди за проследяване на очите. Това води до изпълнението на повече експерименти и паралелно.

- Въпреки по-ниската им цена, те могат да предложат достатъчно добро представяне за задачи като визуално търсене и взаимодействие с компютърни интерфейси.

Нискобюджетните тракери за очи не разполагат с пълен комплект оборудване около тях (лаптоп, софтуерни пакети за настройка и провеждане на експериментите), което ги прави по-податливи на грешки в тяхната употреба, водещи до резултати с по-ниско качество.

Някои от нискобюджетните устройства за проследяване на очите и отворени системи са:

- носимото устройство за проследяване на очите на RIT,
- Open Gaze and Mouse Analyzer (OGAMA),
- Pupil,
- ITU Gaze Tracker,
- OpenEye,
- EyeWriter.

Те попадат в това определение, тъй като предлагат отворен достъп до своите технологии и позволяват на потребителите да ги адаптират за изследвания или практическо приложение.

Съществуват и ръчно направени в домашни условия (Do-It-Yourself) устройства за проследяване на погледа. Те могат да бъдат построени от евтини компоненти, които лесно могат да бъдат закупени. Модулът за улавяне се състои от модифицирана камера и IR LED. Подробностите за частите и материалите са показани в табл. 1.

Таблица 1. Списък на материалите, използвани за DIY устройството

№	Име на частта	Количество
1	Уебкамера Sony PlayStation (PS3)	1 бр.
2	Рамка за очила	1 бр.
3	IR LED Ø 5 mm	1 бр.
4	Въглероден резистор 1/4W 330 Ohm	1 бр.
5	Негативен филм	2 cm
6	Електрически проводник Ø 4 mm	10 cm
7	Кабелни връзки	4 бр.
8	Термосвиваемо покритие Ø 15 mm	10 cm
9	Спойка	5 cm

Изграждането на очилата за проследяване на погледа DIY е описано в десет стъпки в [19]. Текстът описва как да се направят „Направи си сам“ очила за проследяване на погледа с помощта на камера от PS3 и инфрачервен (IR) LED източник. Процесът включва разглобяване и модификация на камерата, премахване на IR филтър, монтиране на IR LED за осветяване на зеницата и прикрепване на модула към рамката на очилата.

3.2. Системите за проследяване на погледа с висока стойност

Когато точността и прецизността на системите за проследяване на погледа с ниска стойност са прекалено ниски е недостатъчно подходящо да бъдат заменени с устройства за проследяване на очите с висока стойност. Те са значително по-подходящи за висококачествени изследвания.

Системите с висока стойност за проследяване, които обикновено надвишават 300 Hz и могат да достигнат до 1000 Hz или повече, предлагат значително предимство по отношение на детайлността и прецизността на събраните данни. Тези системи могат да улавят по-фини движения на очите, които са от критична важност при научни изследвания, изискващи висока точност.

Фактори като настройка, софтуер за калибриране, запис и обработка на данни са част от по-скъпите утвърдени тракери за очи. Интегрирани са в пакети, които се доставят при поръчка на даден тракер: лаптоп, софтуерни пакети за настройка и провеждане на експериментите, стимулационен екран, възможности за прикрепване на тракера за очи към този стимулационен екран (така че той да бъде автоматично правилно позициониран) и други.

Системите с висока скорост, освен че са по-скъпи, водят до повече измервания на секунда. Това е важно при прилагане на алгоритми за откриване на събития.

4. Методи за проследяване на погледа

Няколко са методите за измерване на движенията на очите, които дават информация за посоката на погледа и визуалното внимание. Всички използват някакъв вид сензорна технология (механична, електрическа, светлинна или видео), за да записват и анализират тези движения, и се прилагат в различни научни и технологични изследвания. Основната разлика е в технологичния подход и прецизността на всяка система. Сред основните методи са:

- Метод на склерената търсачка (SSC).
- Инфрачервена окулография (IROG).
- Електроокулография (EOG).
- Видеоокулография (VOG).

4.1. Метод на склерената търсачка (SSC)

Методът на склерената търсачка (Scleral Search Coil, SSC) включва поставяне на медна намотка, вградена в контактна леща или пръстен, върху склерата на окото. Системата измерва ориентацията на окото в магнитни полета, предлагайки висока прецизност и резолюция, което я прави „златен стандарт“ за много изследвания, въпреки че методът може да бъде насилствен и да влияе на движението на очите.

4.2. Инфрачервена окулография (IROG)

Инфрачервената окулография (Infrared Oculography, IROG) използва инфрачервена светлина за осветяване на окото и камера за улавяне на отражението, което помага за измерване на движенията на очите. Тази техника предлага добра точност и може да се използва за различни изследвания на зрителната активност и фокусиране, но може да бъде повлияна от разлики в цвета на ириса и размера на зеницата.

4.3. Електроокулография (EOG)

Електроокулографията (EOG) измерва движението на очите чрез записване на електрически потенциали, генерирани от разликата в електрическите заряди между роговицата и ретината. Методът е полезен за изследване на по-големи движения на очите и може да се използва, дори когато очите са затворени. Има по-ниска точност в сравнение с други технологии и може да бъде чувствителен на шум.

4.4. Видеоокулография (VOG)

Видеоокулографията (Video Oculography, VOG) използва камери за заснемане на видеозаписи на окото и анализ на движението му чрез алгоритми за обработка на изображения. Тази техника предлага висока резолюция и прецизност и е подходяща за изучаване на малки и бързи движения на очите. Качеството на данните може да зависи от условията на осветление и характеристиките на камерата.

Поради високата си точност е широко използван в научни изследвания. Може да се приложи за дистанционно проследяване на очите (без физически контакт).

Тенденция е провеждането на онлайн експерименти с проследяване на очите чрез собствената уебкамера на участниците [21 – 22], в комбинация с платформи с отворен код за запис и обработка на данни [23 – 24].

5. Софтуер за изследване на погледа

Софтуерът за изследване на погледа (Eye Tracking) се използва за проследяване на движенията на очите и изследване на начина, по който хората възприемат визуална

информация. Тези технологии намират широко приложение и в картографията. Редица изследователи са разработили няколко инструмента, методи и алгоритми, като най-известни са тези за:

- Анализ на данни от проследяване на погледа ET2Spatial.
- Анализ на подравняване на последователности EyeMSA.
- Анализ и сравнение на пътеките на погледа (scanpaths) ScanGraph.
- Анализ на данни от проследяване на очите EyeMMV.
- Събиране на данни. Тук може да се използва софтуерът Hypothesis.

5.1. ET2Spatial

Както се споменава в [25], е разработен инструмент с отворен код за анализ на данни от проследяване на погледа, записани върху динамични интерактивни уеб карти. ET2Spatial се основава на съществуващата технология MapTrack. Разработеният инструмент опростява трудоемката задача кадър-по-кадър анализ на екранни записи чрез геореферирани на координатите на екрана, наблюдавани чрез очен тракер. За целта се извършва преобразуване на координатите на екрана, на които е насочен погледът на участника, в реални географски координати.

Разработеният софтуер е тестван задълбочено по отношение на производителността и точността. Той има за цел да подобри изследователските възможности в областта на проследяването на погледа в геовизуализациите.

За начало се приемат три входни файла: сурови точки, точки на фиксация и данни за взаимодействие на потребителя. Тези входни набори от данни се обработват предварително, синхронизират се въз основа на времеви отпечатъци и се съединяват. Основното преобразуване на точките се основава на формулите на Web Mercator проекцията. Експортирането на файлове е в широко използвани формати за пространствени данни.

ET2Spatial има потенциал да бъде мащабиран и може да се използва за изследвания на използваемостта на интерактивни картографски медии, както и за анализ на човешкото взаимодействие и когнитивното познание с уеб карти.

5.2. EyeMSA

EyeMSA, разработен от Burch през 2018 г. [26], е инструмент, който анализира движенията на очите на потребителите, когато разглеждат визуални обекти. Основната му цел е да открива и сравнява „пътеките на погледа“, т.е. последователностите, по които хората насочват очите си върху визуална информация. По този начин инструментът улеснява подравняването и сравнението на последователностите, което е особено полезно при анализ на когнитивни процеси и поведение при взаимодействие с визуални обекти.

EyeMSA помага за разкриването на сходства и разлики в начина, по който различни хора сканират визуална информация в картографиране и интерактивни визуални среди.

5.3. ScanGraph

Множеството пътеки на погледа на участниците могат да бъдат сравнени чрез метода ScanGraph, създаден от Dolezalova и Popelka. Основната цел на ScanGraph е да

улесни визуализирането и сравнението на тези пътеки, което позволява на изследователите да идентифицират общи модели в движенията на очите на участниците по време на различни задачи. Този инструмент е използван не само в областта на картографията, но и в географското образование [27 – 28] и образованието по физика [29]. С помощта на ScanGraph се изследват когнитивните процеси и начините, по които потребителите взаимодействат със сложни визуални обекти, като например интерактивни карти или образователни материали.

5.4. EyeMMV

EyeMMV е инструмент за анализ на данни от проследяване на очите, разработен от Krassanakis през 2014 г. [30] като MATLAB toolbox. Основната цел на EyeMMV е да осигури пълна поддръжка за анализиране на данни от проследяване на очите, като предлага разнообразие от функции за обработка и визуализация на тези данни.

Инструментът позволява на изследователите да анализират важни метрики, свързани с движенията на очите, като фиксации, сакади и пътеки на погледа, което е от решаващо значение за разбирането на когнитивните процеси по време на взаимодействие с визуални и географски данни. EyeMMV се използва широко в изследванията за картография, геопространствени системи и други области, свързани с анализ на визуални стимули.

5.5. Hypothesis

Платформата Hypothesis е създадена чрез сътрудничество между географи и психолози, сред които е и Šašinka. Тя е основно предназначена за експериментални изследвания в области като картографията и психологичната диагностика, като използва запис на данни за потребителите [31]. Уеб базираната платформа предлага възможност за създаване на различни интерактивни тестове, включително такива с 3D обекти и графичен материал.

6. Хардуер за изследване на погледа

Хардуерите за следене на погледа намират широко приложение в различни области, като една от най-активните сфери е картографията, където се използват за анализ на визуалното възприемане на географски карти и навигационни системи. Чрез проследяване на погледа може да се изследва кои елементи на картите привличат най-много внимание, как потребителите интерпретират пространствената информация и какви подобрения могат да бъдат направени за по-ефективно представяне на данните.

6.1. Tobii Pro Spectrum

Tobii Pro Spectrum [32] е система за проследяване на очите, която предлага изключителна точност и висока честота на вземане на проби, което я прави идеален инструмент за изследователи, занимаващи се с картографски анализи. Устройството е проектирано да работи в различни среди, включително лаборатории и полеви изследвания, като осигурява гъвкавост на настройките, адаптирани към конкретни нужди. Tobii Pro Spectrum също така предлага отлична поддръжка на софтуер, позволявайки на изследователите да анализират данните лесно и ефективно.

6.2. EyeLink 1000 Plus

EyeLink 1000 Plus [33], разработен от SR Research, е известен със своето прецизно проследяване на очите, постигнато чрез използването на опора за брадичката, която стабилизира главата на участника. Това устройство предлага много висока честота на запис, която достига до 2000 Hz, и е оптимално за изследвания, изискващи висока детайлност. EyeLink 1000 Plus е широко използван в академични изследвания за психология и когнитивна наука, благодарение на надеждността и качеството на предоставените данни.

6.3. GazePoint

GazePoint [34] е от първите достъпни устройства за проследяване на очите. GazePoint предлага различни модели хардуер устройства за проследяване на очите, като най-популярни са:

- **GP3**, създадено от канадска стартираща компания през 2013 година. То е устройство за проследяване на очите, което се свързва към компютър чрез USB. Поддържа скорост на проследяване до 60 Hz, което го прави подходящо за много научни и комерсиални приложения.
- **GP3 HD** е по-висок клас модел с по-голяма точност и скорост (до 150 Hz), което го прави подходящо за по-детайлни изследвания и приложения.

6.4. SMI RED250

SMI RED250 [35] също е много популярен в картографските изследвания и изследванията на потребителски интерфейси, тъй като предлага добър баланс между цена и възможности.

6.5. The EyeTribe Tracker

The Eye Tribe Tracker [36] е устройство, което вече не е на пазара, но е закупено от Tobii през 2016 година. Въпреки че вече не се произвежда, е било едно от най-достъпните решения за проследяване на очите в картографията, използващо инфрачервена камера и LED осветление.

7. Алгоритъм на разсейване

Сакадата (от френския глагол *saccader*, което означава „дърпам“ или „тегля рязко“), въведена от френския офталмолог Émile Javal в края на 19-ти век, е бързо, рязко движение на очите, при което погледът се пренасочва от една точка към друга. Това движение е неволево и служи за преместване на вниманието между различни обекти или зони в зрителното поле. Сакадите са характерни с висока скорост и кратка продължителност – обикновено траят между 20 и 200 милисекунди.

Фиксация в контекста на проследяване на погледа е моментът, когато очите се спират и задържат фокуса си върху конкретен обект или точка за определен период от

време. По време на фиксация визуалната информация се обработва и интерпретира от мозъка. Фиксациите са важни, защото именно по време на тях се извършва усвояването на визуална информация, докато по време на сакадите (бързите движения на очите) не се възприема нова информация.

$$FD = T_1 - T_2, \quad (1)$$

където FD (Fixation Duration) е измереното налягане;

T_2 – време за края на фиксацията;

T_1 – началото на фиксацията.

Фиксацията може да се разглежда като средната позиция по X и Y координати, измерена за минимален период от време, през който окото не се движи повече от определено максимално количество. По-просто казано, точката на погледа трябва да остане непрекъснато в малка зона за минимално време [37].

Почти всеки алгоритъм за класификация на движенията на очите има набор от входни параметри, които могат значително да повлияят на резултата от класификацията.

Фиксациите и сакадите са основни характеристики на движението на очите, които трябва да бъдат идентифицирани с помощта на алгоритми за предварителна обработка и анализ на данните. Някои от най-популярните алгоритми, използвани за тази цел са следните:

✓ Алгоритъм на I-DT (Identification by Dispersion-Threshold)

I-DT е един от най-простите алгоритми за идентифициране на фиксации и сакади. Той се основава на задаване на праг на дисперсия (разсейване) на точките на погледа и праг на времетраене.

Първата стъпка е изчисляване дисперсията на координатите на погледа в рамките на подвижен прозорец от точки. Ако дисперсията е под зададен праг за фиксиран период от време, това се счита за фиксация. Ако разстоянието между точките надвишава прага, това се интерпретира като сакада. Предимствата са, че е лесен за изпълнение и не изисква сложни изчисления.

В тази статия [38] е реализиран алгоритъм за откриване на фиксации на базата на дисперсия (I-DT) от Salvucci и Goldberg през 2000 г. [39], като се доказва хипотезата, че всички индикатори (процент на включените точки на погледа, брой фиксации, позиция на фиксациите и пространствено разпределение) са функции както на използваната метрика за дисперсия, така и на стойността на прага. Това означава, че различните метрики и прагове влияят значително на резултатите от анализа на фиксациите.

Оптималният праг за всяка метрика се определя като този, при който няколко индикатора (броят на фиксациите, позицията им, размерът и разпределението) са оптимизирани така, че най-точно да отразяват реалния поглед на наблюдателя. В изследването на Blignaut [38] се установява, че праговете в диапазона между $0,7^\circ$ и $1,3^\circ$ са приемливи, и че настройки извън този диапазон могат да доведат до неточности в идентификацията на фиксациите.

Едно от най-големите ограничения на наличните алгоритми за откриване на фиксации е фактът, че настройките на параметрите са от решаващо значение. При промяна в параметрите може да се стигне до промяна в отчетената продължителност на фиксациите.

✓ Алгоритъм на I-VT (Identification by Velocity-Threshold)

Този алгоритъм определя фиксациите и сакадите на базата на скоростта на движението на очите. В случая с алгоритъма стойността на скоростта на движението на очите се сравнява с праг. Процесът включва:

- Изчисляване на скоростта на движение на погледа между две последователни точки.
- Ако измерената скорост е по-малка от прага, съответната позиция на очите се отбелязва като част от сакада.
- Ако скоростта е по-голяма, то позицията на очите се присвоява като част от фиксация.

Алгоритъмът открива сакадите като основно движение на очите. Фиксациите се отчитат между две сакади. Предимство при идентифицирането на сакади, които се характеризират с висока скорост на движение, е тяхната ефективност.

✓ Алгоритъм на I-HMM (Hidden Markov Model)

Алгоритъмът HMM използва скрити маркови модели за класифициране на движението на очите като фиксация или сакади. Моделът се състои от модели от данни и е подходящ за по-сложни задачи с несигурност и шум.

✓ Алгоритъм на I-VMM (Velocity-Movement Model)

Този алгоритъм е подобен на I-VT, но използва допълнителни параметри като амплитуда на движението на очите. По-точен е от I-VT и I-DT при идентифициране на сакадите.

✓ Клъстеризиращи методи (Clustering-based methods)

Тези методи използват алгоритми за клъстеризация, като например K-means или DBSCAN, за групиране на точките на фиксация и сакадите.

Точките на погледа се групират в клъстери въз основа на близостта им и времето на задържане в дадена област. Клъстерите с ниска дисперсия и голямо времетраене се разглеждат като фиксация, а останалите като сакади.

✓ Алгоритъм на I-MST (Minimum Spanning Tree)

Този алгоритъм използва методи за минимално дърво на покриване, за да идентифицира фиксация.

Алгоритъмът започва със свързване на точките на погледа в дърво, което минимизира общото разстояние между тях. Дървото се анализира и разглежда клъстери от близки точки като фиксация, а големите разстояния между точките като сакади.

✓ Machine Learning-базирани подходи

Съществуват и модели, основани на машинно обучение, които използват предварително етикетирани данни, за да обучат алгоритми за класификация. Използват се алгоритми като Random Forest, Support Vector Machines (SVM) или Neural карта.

Всеки от тези алгоритми има своите предимства и недостатъци, а изборът на подходящ алгоритъм зависи от специфичните изисквания, точността на данните и наличните изчислителни ресурси.

8. Точност и прецизност

Точността се измерва чрез разстоянието между записаните фиксационни позиции и реалната позиция на погледа. Разстоянието между двете позиции се нарича отклонение. Най-често се използва изкуствено око, за да се създадат надеждни и контролирани движения на очите.

Прецизността се представя чрез стандартното отклонение на тези измервания. Тя се отнася до способността на устройството надеждно да възпроизвежда позиции на погледа в пространството [40 – 41]. Възможно е да се оценява и времевата прецизност на уреда за проследяване на очите (скорост на проби). Правилното настройване и избор на софтуер за запис и обработка на данните са от съществено значение за получаване на добри резултати.

Качеството на данните се формира именно от точността и прецизността. Само чрез тях записаните данни може да се считат за сравними.

В статията на Ooms и др. [42] авторите правят оценка на една от бюджетните системи за проследяване на очите – уредът The Eye Tribe – като сравнява неговата точност и прецизност с тази на сравним добре установен и по-скъп уред за проследяване на очите SMI RED 250 в различни експериментални условия. Това включва, наред с други, вариации в позиционирането на устройствата, скорост на проби, алгоритми за откриване на фиксации, софтуер за запис и други.

Проучванията показват, че разлики в прецизността на данните между различни модели на очни тракери могат да бъдат изключително големи, вариращи с порядък на величина, което подчертава значителната нееднородност в качеството на данните [43].

8.1. Фактори, свързани с качеството на данните

При оценката на система за проследяване на очите е от значение качеството на (суровите) данни, които се произвеждат от нея. Факторите могат да се групират като свойства и характеристики, както на самото устройство за проследяване на очите, така и на участниците.

Калибрацията процедура, околната среда (каква е осветеността), в която е проведено изследването, прилагат ли се или не филтри, какви са настройките на експеримента (относителното положение на устройствата), честотата на вземане на проби са ключови фактори за постигане на високо качество на данните, които са от съществено значение за надеждността на изследванията.

Освен точността и прецизността забавянето на сигнала е още един фактор, който може да влияе на качеството на данните. Това е времето, което устройството изразходва, за да обработи и предаде информацията за позицията на очите. Системи с високо забавяне може да не успеят да регистрират бързи движения на очите точно, което намалява качеството на данните.

Процедурата по калибриране има за цел да настрои устройството спрямо индивидуалните особености на участниците, като разстоянието между очите, формата на лицето и други физически характеристики. Некоректното калибриране може значително да намали точността и прецизността на данните, особено ако калибрирането не е оптимално за конкретната задача или среда.

Осветлението и други характеристики на околната среда също имат важна роля за качеството на данните. Прекалено яркото осветление или отблясъци могат да повлияят на способността на системата да регистрира движенията на очите правилно. Също така, движещи се обекти в периферното зрение на участника или промени в осветеността могат да внесат шум в данните, което затруднява анализа.

При избора на филтри за обработка на данните също трябва да се вземат предвид специфичните нужди на изследването. Различните филтри могат да елиминират шума в данните, но прекаленото филтриране може да доведе до загуба на важна информация, като например фини движения на очите, които са от значение за задачата. Затова е важно да се намери баланс между почистването на данните и запазването на критичните детайли.

Към момента все още няма стандарти относно това какво трябва да се отчита, тъй като някои свойства зависят основно от задачата, която трябва да бъде изпълнена.

Една от най-добре документираните характеристики на устройство за проследяване на очите е честотата на вземане на проби. Обикновено се прави разграничение между системи с висока и ниска скорост [40]. Въпреки че няма ясно разграничение между тези два типа системи, честота на вземане на проби от 250 Hz обикновено се счита за минимална за системи с висока скорост.

8.2. Праг на продължителност

Праг на продължителност при системите за следене на погледа е минималната продължителност на фиксация, която трябва да бъде отчетена от системата като валидна фиксация на обекта или областта. Ако фиксацията е твърде кратка, тя може да бъде игнорирана или интерпретирана като шум. За да се филтрират такива кратки и незначителни фиксации, се въвежда праг на продължителност. В друг случай, ако прагът на продължителност е зададен на 100 милисекунди, системата ще отчете само тези фиксации, които са по-дълги от 100 милисекунди.

Fabrikant [44] също изследва четенето на карти за време с помощта на проследяване на очите. Тя задава праг на алгоритъма за продължителност на 100 ms. Тази стойност е зададена на базата на наличната теория. Çöltekin в двете си изследвания ([15, 45]) също задава стойност на прага за продължителност на 100 ms. Hermans и Laarni [46] използват по-кратък праг от 80 ms.

Този праг е важен, защото помага да се разграничат съзнателните визуални фиксации от бързите движения на очите (сакади), които не са свързани с обработка на информация.

8.3. Праг на разсейване

Праг на разсейване е допустимото разстояние или ъгъл, с който погледът на потребителя може да се отклони от дадена фиксирана точка, преди да се счита, че е преминал към друга фиксация или обект.

В областта на картографията Hermans и Laarni [46] използват праг на разсейване от 2×2 градуса за своето проучване. Целта на тяхното изследване е да се придобие знание за възприятията и когнитивните процеси на хората при търсенето на обект на карта.

Çöltekin [45] изследва ефективността на визуалните аналитични стратегии на потребителите. Тя използва устройство за проследяване на очите Tobii X120 с алгоритъм I-DT. Прагът на разсейване е зададен на 50 пиксела. Авторът посочва, че стойността на

разсейването не произлиза от ясно установени правила. Същата авторка използва тази настройка и в своето изследване за оценка на дизайна на интерфейс карти.

8.4. Оптимални настройки за картографски цели

Картографските изображения често съдържат голямо количество малки и подробни елементи, като немащабни знаци, линии и текст. По-нисък праг за продължителност (например 80 ms) и праг за разсейване от 50 пиксела позволяват откриване на кратки и малки фиксации, което е полезно при анализа на вниманието върху дребни детайли.

При картографски изследвания, където се наблюдава как потребителите търсят или интерпретират различни елементи върху картите, те се нуждаят от гъвкави настройки. Например необходимо е по-голямо улавяне и по-кратки фиксации, които могат да дадат по-добра представа за това как вниманието на потребителя се движи върху картата и какви елементи привличат интереса му.

Както вече е отбелязано в предходните точки, алгоритми за идентифициране на фиксации (I-VT или I-MST) могат да бъдат използвани при анализи със системи за следене на погледа. В зависимост от целта на изследването, тези алгоритми може да се окажат по-подходящи в някои случаи, но I-DT е особено ефективен за динамични визуални данни, каквито често се срещат в картографските изследвания.

Popelka [47] подчертава важноста на правилната настройка на праговете на алгоритъма I-DT за откриване на фиксации при използването на технологии за проследяване на очите в картографските изследвания. Въз основа на тестването на четири различни настройки се заключава, че настройката с праг за продължителност от 80 ms и праг за разсейване от 50 пиксела дава най-добро съответствие между необработените данни и фиксациите. Това е от значение за правилното интерпретиране на визуалните данни. Настройките, които позволяват откриването на повече фиксации с по-кратка продължителност, са по-подходящи за картографски цели.

9. Предимства и недостатъци на използването на системите за следене на погледа в картографията

Технологиите за следене на погледа предлагат значителни предимства при разработването на картографски продукти и интерфейси. Те позволяват на картографите да получат изключително точна информация за поведението на потребителите при взаимодействие с картите. Въпреки това, както всяка друга технология, и следенето на погледа има своите ограничения и предизвикателства, които трябва да се вземат предвид при използването му.

Основно предимство е предоставянето на възможност за изследване на вниманието на потребителите и на това как те възприемат картографска информация. Следенето на погледа позволява да се разберат визуалните предпочитания на потребителите и как те възприемат различни стилове на картографиране. Тези данни могат да се използват за създаване на по-интуитивни и визуално приятни картографски интерфейси.

Един от основните проблеми на технологиите за следене на погледа е тяхната точност. Въпреки че съвременните системи за следене на погледа са много напреднали, те не са напълно безпогрешни. Също така много от най-точните и напреднали технологии за следене на погледа изискват специализирана апаратура като очила със сензори или преносими устройства.

Следенето на погледа генерира голям обем от данни, които трябва да бъдат внимателно обработени и анализирани. Това може да включва обработка на хиляди точки на фиксация и сакади, което изисква значителни компютърни ресурси и време за анализ. Динамичните области на интерес (Areas of Interest), които са особено полезни за интерактивни среди, също представляват предизвикателство. Макар нови инструменти като тези на Papenmeier и Huff [48] да облекчават процеса, остава трудността при работа с бързо променящо се съдържание, където мащабирането и панорамните движения затрудняват ръчното дефиниране на АОІ.

10. Заключение

Проследяването на погледа е изключително мощен и точен метод за изследване на визуалните стратегии и поведението на потребителите при взаимодействие с различни видове визуална информация, включително карти и интерактивни медии. Този метод предоставя обективни данни, които са трудни за получаване с други техники, като например детайлна информация за времето, прекарано в различни секции на геопортали или в разглеждане на извънкартно съдържание и легенди. Въпреки че анализът на данните от проследяване на очите предлага ценно разбиране за различията във визуализациите, той отнема време и изисква значителни ресурси за съхранение на данни.

ЛИТЕРАТУРА

1. *International Organization for Standardization*. ISO 9241-11: Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs) – Part 11: Guidance on Usability. ISO, 1998.
2. *Yarbus, A. L.* Eye movements and vision. Plenum Press, 1967.
3. *Jenks, G. F.* Visual integration in thematic mapping: fact or fiction? *International Yearbook of Cartography*, 13, 27–35, 1973.
4. *Jenks, G. F.* The average map-reader lives. Paper presented at the Annual meeting of the Association of American Geographers, Seattle, Washington, 1974.
5. *Castelhana, M., Rayner, K.* Eye movements during reading, visual search, and scene perception: An overview. *Visual Cognition*, 2008.
6. *Schiessl, M., S. Duda, A. Thölke, R. Fischer.* Eye tracking and its application in usability and media research. *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2003.
7. *Zambarbieri, D., Carniglia, E., Robino, C.* Eye Tracking Analysis in Reading Online Newspapers. *Journal of Eye Movement Research*, 2008.
8. *Akinlofa, O. R., Holt, P. O. B., Elyan, E.* The cognitive benefits of dynamic representations in the acquisition of spatial navigation skills. *Computers in Human Behavior*, 30, 238–248, 2014.
9. *Ooms, K., De Maeyer, P., Fack, V., Van Assche, E., Witlox, F.* Interpreting maps through the eyes of expert and novice users. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(10), 1773–1788, 2012.
10. *Brychtova, A., Popelka, S., Dobesova, Z.* Eye-Tracking methods for investigation of cartographic principles. In *Proceedings of the 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO, Varna, Bulgaria, 17–23 June 2012; Volume 2*, pp. 1041–1048.
11. *Dupont, L., Antrop, M., Van Eetvelde, V.* Eyetracking Analysis in Landscape Perception Research: Influence of Photograph Properties and Landscape Characteristics. *Landscape Research*, 39(4), 417–432, 2014.

12. *Pieters, R.* A review of eye-tracking research in marketing. *Review of Marketing Research*, 4, 123–147, 2008.
13. *Vansteenkiste, P., Cardon, G., D'Hondt, E., Philippaerts, R., Lenoir, M.* The visual control of bicycle steering: The effects of speed and path width. *Accident Analysis and Prevention*, 51, 222–227, 2013.
14. *Vetturi, D., Tiboni, M., Maternini, G., Bonera, M.* Use of eye tracking device to evaluate the driver's behaviour and the infrastructures quality in relation to road safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019.
15. *Çöltekin, A., Heil, B., Garlandini, S., Fabrikant, S. I.* Evaluating the effectiveness of interactive map interface designs: A case study integrating usability metrics with eye-movement analysis. *Cartography and Geographic Information Science*, 36(1), 5–17, 2009.
16. *Ślomska, K.* Types of maps used as stimuli in cartographical empirical research. *Miscellanea Geographica*, 22(3), 157–171, 2018. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2018-0014>.
17. *Krassanakis, V., Cybulski, P.* A review on eye movement analysis in map reading process: The status of the last decade. *Geodesy and Cartography*, 68(1), 191–209, 2019. <https://doi.org/10.24425/gac.2019.126088>.
18. *Unrau, R., Kray, C.* Usability evaluation for geographic information systems: a systematic literature review. *International Journal of Geographic Information Science*, 33(4), 645–665, 2019. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1554813>.
19. *Janthanasub, V., Meesad, P.* Evaluation of a Low-cost Eye Tracking System for Computer Input. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, 8(2), 45-50, 2015. <https://doi.org/10.14416/j.ijast.2015.07.001>.
20. *International Organization for Standardization.* ISO 9241-9: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) – Part 9: Requirements for non-keyboard input devices. ISO, Geneva, Switzerland, 2000.
21. *Todd, C. A., Albatat, M., Suchak, A.* Eyesee; an assistive device for blind navigation with multi-sensory aid. *Proceedings of the 2015 International Conference on Systems Engineering (ICSEng)*, 2015.
22. *Papoutsaki, A., Laskey, J., Huang, J.* SearchGazer: Webcam Eye Tracking for Remote Studies of Web Search. *Proceedings of the 2017 ACM SIGIR Conference on Human Information Interaction and Retrieval*, 2017.
23. *Dalmajer, E., Mathôt, S., van der Stigchel, S.* PyGaze: An open-source, cross-platform toolbox for minimal-effort programming of eyetracking experiments. *Behavior Research Methods*, 2014.
24. *Krassanakis, V., Filippakopoulou, V., Nakos, B.* EyeMMV toolbox: an eye movement post-analysis tool based on a two-step spatial dispersion threshold for fixation identification. *Journal of Eye Movement Research*, 7(1), 2014. <https://doi.org/10.16910/jemr.7.1.1>.
25. *Sultan, M. N., Popelka, S., Strobl, J.* ET2Spatial—software for georeferencing of eye movement data. *Journal of Eye Movement Research*, 2022.
26. *Burch, M., Kurzhals, K., Kleinhans, N., Weiskopf, D.* EyeMSA: exploring eye movement data with pairwise and multiple sequence alignment. *Proceedings of the 22nd IEEE Conference on Information Visualization*, 2018.
27. *Beitlova, M., Popelka, S., Voženilek, V.* Differences in Thematic Map Reading by Students and Their Geography Teacher. *Miscellanea Geographica*, 2020.
28. *Popelka, S., Beitlova, M.* Scanpath Comparison using ScanGraph for Education and Learning Purposes: Summary of previous educational studies performed with the use of ScanGraph. *Miscellanea Geographica*, 2022.
29. *Škrabánková, J., Popelka, S., Beitlova, M.* Students' ability to work with graphs in physics studies related to three typical student groups. *Physics Education*, 2020.

30. Krassanakis, V., Filippakopoulou, V., Nakos, B. EyeMMV toolbox: an eye movement post-analysis tool based on a two-step spatial dispersion threshold for fixation identification. *Journal of Eye Movement Research*, 7(1), 2014. <https://doi.org/10.16910/jemr.7.1.1>.
31. Šašinka, Č., Stachoň, Z., Čeněk, J., Šašinkova, A., Popelka, S., Ugwitz, P., Lacko, D. A comparison of the performance on extrinsic and intrinsic cartographic visualizations through correctness, response time and cognitive processing. *PloS One*, 16(4), e0250164, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250164>.
32. Tobii Pro Spectrum. Produktov sayt za Tobii Pro Spectrum. 02.10.2023, <https://www.tobii.com/products>.
33. EyeLink 1000 Plus – SR Research. Ofitsialen sayt za EyeLink 1000 Plus. 18.11.2023, <https://www.sr-research.com>.
34. Gazepoint GP3 – Gazepoint. Ofitsialen sayt na Gazepoint za modela GP3. 04.07.2024, <https://www.gazepoint.com>.
35. SMI RED250 – iMotions. Ofitsialen produktova stranitsa za SMI RED250. 17.11.2023, <https://imotions.com>.
36. The Eye Tribe Tracker – Eye Tribe. Tehnicheski sayt. 05.08.2023, <https://theeyetribe.com>.
37. Applied Science Group. EYENAL (eye-analysis) software manual. Bedford, MA: Applied Science Group, 2001.
38. Blignaut, P. Fixation identification: The optimum threshold for a dispersion algorithm. *Behavior Research Methods*, 2009.
39. 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* (pp. 71–78). New York: ACM Press, 2000.
40. Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., van de Weijer, J. *Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures*. Oxford University Press, 2011.
41. Holmqvist, K., Nyström, M., Mulvey, F. Eye tracker data quality: What it is and how to measure it. *Journal of Eye Movement Research*, 2012.
42. Ooms, K., Dupont, L., Lapon, L., Popelka, S. Accuracy and precision of fixation locations recorded with the low-cost Eye Tribe tracker in different experimental set-ups. *Journal of Eye Movement Research*, 2015.
43. Andersson, R., Larsson, L., Holmqvist, K., Stridh, M., Nystrom, M. One algorithm to rule them all? An evaluation and discussion of ten eye movement event-detection algorithms. *Behavior Research Methods*, 49(2), 616–637, 2017. <https://doi.org/10.3758/s13428-016-0738-9>.
44. Fabrikant, S. I., Hespanha, S. R., Hegarty, M. Cognitively inspired and perceptually salient graphic displays for efficient spatial inference making. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(1), 13–29, 2010.
45. Çöltekin, A., Fabrikant, S., Lacayo, M. Exploring the efficiency of users' visual analytics strategies based on sequence analysis of eye movement recordings. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(10), 1559–1575, 2010.
46. Hermans, O., Laarni, J. Searching Information from Screen Maps. In *ScanGIS Conference Proceedings*, 2003.
47. Popelka, S. Optimal Eye Fixation Detection Settings for Cartographic Purposes. *Journal of Eye Movement Research*, 2014.
48. Papenmeier F, Huf M DynAOI: a tool for matching eye-movement data with dynamic areas of interest in animations and movies. *Behav Res Methods* 42(1):179–187, 2010. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.1.179>.

ADVANCEMENT IN EYE-TRACKING SYSTEMS AND THEIR ROLE IN CARTOGRAPHY

N. Nikolova¹

Keywords: cognitive processes, saccades, fixation, eye-tracking, algorithms, cartography

ABSTRACT

Eye-tracking technology is one of the most popular techniques for human-computer interaction. The primary function of this technology is based on a device that tracks the movement of the pupil to identify position or scan a display. Currently, eye-tracking devices are becoming more affordable, making them an accessible resource for research.

The paper examines the advancement in the development of eye-tracking systems with specific applications for cartography. The goal of the study is to provide a systematic review of the historical technological improvements in these systems, analyzing their advantages and limitations in the context of cartographic applications.

Moreover, the article presents technologies for the post-processing of eye-tracking measurements. It evaluates their accuracy and efficiency in achieving an improved understanding of users' visual perceptions, as well as algorithms for dispersing fixations and saccades.

¹ Nikoleta Nikolova, PhD student, Dept. "Photogrammetry and Cartography", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: nnikolova_fgs@abv.bg