



ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ ПРИ ОСМОТРЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ¹

КОЛТУНОВА Т.И., НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

ПЕТРУШАН М.В., НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

САМАРИН А.И., НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

В работе проведено сравнение параметров движений глаз при просмотре двумерных изображений и при навигации в виртуальной трехмерной среде. В навигационных тестах использовались два типа задач: активная навигация в среде, когда испытуемые сами управляли своим перемещением в ней, и пассивная, когда они наблюдали навязанные траектории движения. Обнаружено, что следящие движения более выражены в тестах активной навигации по сравнению с пассивной (67% и 55% от общего количества медленных движений глаз в каждом случае). Кроме того, длительность следящих движений имела тенденцию к увеличению в тестах активной навигации по сравнению с пассивной (479 ± 42 мс и 415 ± 43 мс). В то же время амплитуда и скорость саккад, а также длительность фиксаций были сопоставимы в этих тестах. Особый интерес представляют характерные паттерны движений глаз, согласованные с поворотами камеры обзора виртуальной среды, которые в условиях активной навигации могли опережать поворот, а в условиях пассивной навигации всегда следовали за ним. Представлены данные о существенных различиях параметров глазных движений (длительность фиксаций, пространственное распределение длительности фиксаций на плоскости изображения, пиковая скорость и амплитуда саккад) между тестами навигации в 3D среде и осмотра 2D изображений.

Ключевые слова: зрительное восприятие, навигация, трехмерная виртуальная среда, следящие движения глаз, фиксации, саккады.

Введение

Регистрация движений глаз является одним из немногих способов изучения активности, связанной непосредственно с процессом зрительного восприятия. В общем случае движения глаз зависят от временных и пространственных характеристик изображений (сцен), а также от мотивации, преднастройки и функционального состояния испытуемого. Большинство публикаций в данной области посвящены исследованию механизмов осмотра двумерных изображений. При решении таких задач используется большое количество экспериментальных парадигм и детально описаны количественные результаты экспериментов (Unema et al., 2005; Henderson, 2003; Martinez-Conde et al., 2004).

В случае трехмерных объектов и сцен возникает ряд принципиальных особенностей, связанных с неоднозначностью интерпретации плоских проекций этих изображений при их восприятии человеком. Эта неоднозначность связана не только с тем, что разные объекты в некоторых ракурсах восприятия могут иметь одинаковые зрительные проекции, но и с тем, что при восприятии трехмерных сцен возникают эффекты заслонения, затенения, бликов на объектах и ракурсных искажений их проекций. Снятие такой неоднозначности

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-01-00750а, и РГНФ, проекты №№ 09-06-95218а/Ф и 11-06-00704а.



сти в интерпретации сенсорных сигналов может достигаться за счет организации активного восприятия трехмерных сцен – это изменение ракурса восприятия, перемещение в среде и т.д. По-видимому, любая, даже чисто сенсорная зрительная функция обеспечивается в информационно-управляющей системе человека как поведенческий акт, что соответствует аксиоматике когнитивной психологии (Найссер, 1981) и экологическим моделям зрительного восприятия (Гибсон, 1988).

При перемещении наблюдателя в среде возникает последовательность взаимодополняющих зрительных задач, с каждой из которых могут быть связаны характерные паттерны глазных движений. Так как совокупность решаемых в трехмерной среде задач влияет на движение глаз, можно ожидать принципиальных различий типов траекторий и других характеристик глазных движений при осмотре двухмерных и трехмерных сцен. С другой стороны, такая неоднозначная зависимость треков осмотра от множества поведенческих задач, свойственных живым организмам в естественной среде (или приближенной к естественной), усложняет интерпретацию результатов экспериментов.

Перспективная цель данного исследования – изучение особенностей движений глаз при активной и пассивной навигации в виртуальной трехмерной среде. В эксперименте создавались условия для возникновения навигационно связанных паттернов глазных движений как за счет объективных особенностей теста (высокая скорость поступательных и вращательных движений виртуальной камеры), так и за счет инструкций, согласно которым испытуемый должен как можно быстрее пройти полосу препятствий, обходя выступы. Все эти задачи в исследовательском плане требуют определенных методических разработок, связанных, в частности, с необходимостью синхронной регистрации глазных движений и характеристик перемещений или манипуляционных движений субъекта восприятия во внешней среде.

Постановка такого рода экспериментов для реальных объектов в реальной физической среде представляет большие сложности для биомеханической регистрации параметров субъекта восприятия и количественно варьируемых характеристик объектов среды. Поэтому одной из методических задач такого исследования является разработка специализированных программных средств синтеза виртуальных объектов и зрительных сцен с этими объектами, средств управления перемещением объектов. Виртуальная среда по сравнению с реальной обладает своей спецификой, как и перемещение в такой среде существенно отличается от движений в реальной среде. Так, эффект восприятия объемности фрагментов модельной среды возникает при движении наблюдателя в такой среде, тогда как в естественной среде бинокулярное зрение может давать информацию о пространственных конфигурациях без движения наблюдателя, а поступательное движение и повороты осуществляются не за счет согласованных мышечных нагрузок всего организма, а нажатиями на клавиши управления. Поэтому напрямую обобщать экспериментальные результаты, полученные в синтезированном окружении, на общие закономерности осмотра любой среды было бы некорректно. Однако, видимо, существуют поведенческие параллели между движениями реального организма в сложной среде и виртуальной камеры в модельном окружении. Например, если осмотр невозможно или некомфортно осуществить исключительно за счет глазных движений, то совершаются повороты головы или корпуса в естественной среде, в виртуальной среде осуществляются повороты виртуальной камеры. Преимуществом модельной среды является также точное определение параметров положения, ориентации и скорости движения наблюдателя в окружении, что было бы затруднительным в естествен-



ных условиях. Кроме того, интерес исследований поведения в виртуальной среде, выявление сходства и различия с реальным поведением связаны с популярностью использования виртуальных сред в различного рода тренажерах.

В данной статье описаны методические разработки и представлены первые результаты исследования параметров глазных движений при активной и пассивной навигации в трехмерной виртуальной среде в сравнении с осмотром двухмерных изображений.

Методика

В качестве экспериментальной платформы использовалась система видеорегистрации движений глаз SMI iViewX Hi-Speed 1250. Для синтеза и предъявления зрительных стимулов был разработан программный модуль, совместимый с комплексом iViewX, который позволяет создавать текстурированные трехмерные объекты сложной формы в виртуальной среде (рис. 1). С помощью этого же программного модуля испытуемый клавишами управления курсором может задавать тот или иной тип движения виртуальной камеры в среде.

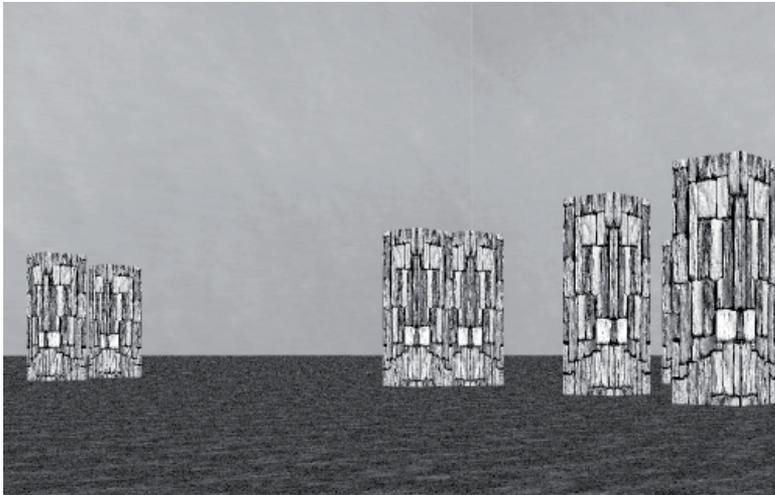


Рис. 1. Фрагмент виртуальной среды с текстурированными объектами

Виртуальная среда представляет собой совокупность поверхностей, моделирующих реальные объекты. Элементы среды представлены набором текстурированных плоскостей. В качестве элемента текстуры опорной поверхности выбрано изображение травянистого покрова, препятствия имеют каменистую текстуру. На опорной горизонтальной поверхности расположена область препятствий, состоящая из 21 вертикально ориентированного объекта. Отношение высоты каждого объекта препятствия к его основанию 5/1. Виртуальная камера, представляющая собой текущую точку наблюдения испытуемого в процессе навигации, была расположена на высоте 1/5 вертикального размера препятствий. Скорость поступательного движения в виртуальной среде была такова, что за секунду камера перемещалась на расстояние, равное вертикальному размеру препятствий. Скорость поворотов камеры относительно своей вертикальной оси равна $1.4 \text{ рад/с} \approx 80^\circ/\text{с}$, при этом линейная скорость проекционных точек на изображении среды равна приблизительно 1140 пикселей/с. Камера вращалась только вокруг вертикальной оси. При расстоянии 80 см до



монитора, на котором предьявлялась виртуальная среда, и его размерах 375 x 300 мм максимальная скорость движения элементов виртуальной сцены относительно глаз испытуемого составляла 23°/с.

В тестах навигации в 3D виртуальной среде участвовали пять испытуемых с нормальным зрением в возрасте от 20 до 28 лет. Протокол эксперимента утвержден комиссией по биоэтике НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ. Во всех тестах расстояние между стимуляционным монитором и испытуемым было 80 см. Размеры монитора составляли 26° поля зрения по горизонтали и 20° – по вертикали, разрешение – 1280x1024 пикселей. Перед тестами основной серии испытуемые выполняли серию обучающих экспериментов с необходимыми инструкциями. Каждый испытуемый сначала участвовал в эксперименте активной навигации, затем – пассивной, в обоих случаях с предшествующей калибровкой системы регистрации глазных движений. В большинстве случаев длительность эксперимента не превышала 2 минут. Тест заканчивался, когда испытуемый полностью проходил полосу препятствий в тестах активного осмотра или осматривал эту полосу в случае движения по навязанной траектории.

Активный навигационный эксперимент. Испытуемый с помощью клавиш управления курсором перемещался в трехмерной среде, огибая препятствия. При этом испытуемому давалась инструкция: как можно быстрее пройти область препятствий, не столкнувшись с колоннами. При активной навигации испытуемый имел возможность с помощью клавиш управления курсором выполнять два вида движений: поступательное перемещение вперед с постоянной скоростью путем нажатия и удержания соответствующей клавиши; повороты направо или налево с постоянной угловой скоростью путем нажатия и удержания соответствующих клавиш поворота.

Пассивный навигационный эксперимент. При пассивной навигации алгоритм перемещений задавался автоматически и задача испытуемого состояла только в осмотре динамических сцен. Испытуемому для осмотра предьявлялась та же среда, но движения камеры определялись не данным испытуемым, а траекторией ее смещений в активном навигационном эксперименте другого испытуемого.

При осмотре изображения испытуемым регистрировалась последовательность координат перемещения центра взгляда во времени на изображении $\{X, Y, T\} = \{x_1, y_1, t_1, \dots, x_m, y_m, t_m\}$, где x – абсцисса центра взгляда на экране монитора, y – ордината центра взгляда на экране, t – время регистрации координат центра взгляда на экране, m – количество зарегистрированных точек положения центра взгляда.

Во всех экспериментах синхронно регистрировались глазные движения и перемещения виртуальной камеры. Частота дискретизации при регистрации глазных движений – 1250/с, при регистрации положения камеры и объектов виртуальной среды – 120/с. Синхронизация записей глазных движений и перемещений камеры осуществлялась по двум временным меткам: в начале и в конце эксперимента.

При анализе данных регистрации движений глаз для детектирования саккад и фиксаций использовался порог скорости 70°/с. Глиссады (корректирующие скачки, следующие в некоторых случаях за саккадами; Bahill, Stark, 1975), фиксации длительностью менее 50 мс и моргания были исключены из дальнейшего анализа. После смещений камеры в виртуальной 3D среде возникали также медленные (менее 40°/с) движения глаз, параметры которых близки к следящим движениям (Зинченко, 1997). Следящие движения (СД) не имели яв-



ного пика скорости. Амплитуда идентифицированных СД в среднем составляла $3.68 \pm 0.29^\circ$. Примеры идентифицированных событий представлены на рис. 2.

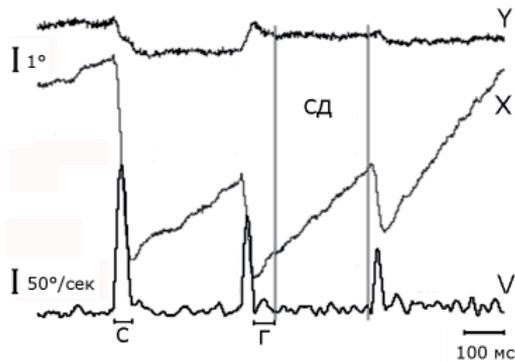


Рис. 2. Примеры событий, идентифицированных в одной из траекторий при решении навигационной задачи. X, Y – координаты взгляда, V – скорость движения глаза, СД – следящее движение, Г – глиссанда, С – саккада

Для сравнения параметров движений глаз при просмотре двухмерных сцен и трехмерной среды в процессе перемещения в ней с теми же испытуемыми была проведена серия тестов по осмотру 2D изображений.

Результаты

Характеристика глазных движений при активной и пассивной навигации в виртуальной трехмерной среде

Наряду с фиксациями и саккадами в траекториях осмотра виртуальной 3D среды наблюдались СД, возникающие в результате смещений виртуальной камеры – точки обзора среды испытуемым. Количество СД в тестах активной навигации составляло 67% ($n=82$), а в тестах пассивной навигации – 55% ($n=57$) от общего количества фиксаций и СД ($p \leq 0.05$). Среди СД, которые могут соответствовать слежению за объектами или неоднородностями в поле зрения при поступательном и вращательном движении в среде, преобладали горизонтальные СД (50% в тестах активной навигации и 43% – пассивной) по сравнению с диагональными СД (17% и 12% соответственно). Средняя длительность СД в навигационных тестах составила 452 ± 31 мс. При этом она имела тенденцию к увеличению в тестах активной навигации по сравнению с пассивной (479 ± 42 мс и 415 ± 43 мс, $p \leq 0.15$). Средняя амплитуда СД ($3.4 \pm 0.3^\circ$ и $3.2 \pm 0.3^\circ$ соответственно), параметры саккад (в частности, амплитуда саккад – $4.7 \pm 0.3^\circ$ и $4.8 \pm 0.3^\circ$) и длительность фиксаций (276 ± 13 мс и 280 ± 13 мс) были сопоставимы в тестах активной и пассивной навигации.

В условиях активной и пассивной навигации в виртуальной 3D среде были проанализированы глазные движения, синхронизированные с поворотом виртуальной камеры. Примеры комплексов единичных событий, ассоциированных с поворотом камеры, показаны на рис. 3. Стрелкой отмечен момент начала поворота камеры (вверх – поворот направо, вниз – поворот налево); по оси ординат – координаты текущего положения глаза в угловых градусах в горизонтальной плоскости («0» соответствует левому краю экрана, максимум – правому). Видно, что в большинстве случаев глазные движения, ассоциированные с поворотом камеры, формируют комплексы чередующихся быстрых и медленных событий; первые идентифицируются как саккады, вторые – как СД.

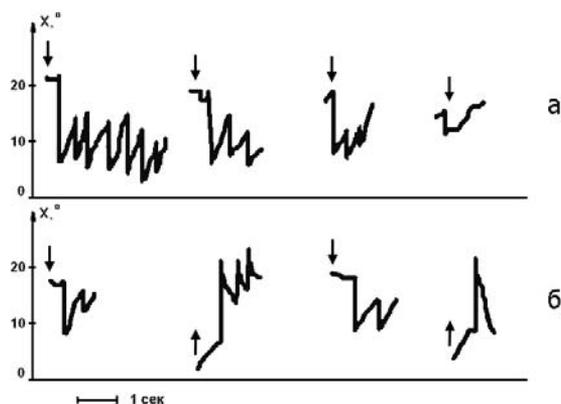


Рис. 3. Примеры регистраций горизонтальной проекции глазных движений, синхронизированных с началом поворота виртуальной камеры, при: а – активном и б – пассивном повороте

При активном повороте камеры испытуемым (рис. 3,а) саккады, ассоциированные с поворотом, могли возникать как после (с небольшой задержкой), так и до поворота камеры (в диапазоне от -60 мс до +300 мс). Высокоамплитудные повороты камеры вызывают характерную пилообразную последовательность СД и возвращающих саккад, которые, как правило, имеют меньшую амплитуду, чем первая саккада в комплексе глазных движений. Частые чередования поворотов камеры или низкоамплитудные повороты не сопровождались таким паттерном (рис. 3,а, крайний правый пример). В отличие от активного поворота камеры, при пассивном повороте (рис. 3,б) ассоциированные саккады наблюдались только после него (в диапазоне от +250 мс до +550 мс). Высокоамплитудные повороты сопровождались, как и при активном повороте камеры, пилообразными паттернами движений глаз.

Для оценки общей тенденции динамики параметров глазных движений, согласованных с поворотом камеры обзора среды, были усреднены единичные паттерны, примеры которых представлены на рис. 3. Результаты такого усреднения горизонтальных смещений позиций глаза приведены на рис. 4. Из непрерывных регистраций движений глаз выбирались фрагменты в диапазоне от -400 мс до +500 мс относительно поворота камеры. «0» на оси абсцисс соответствует моменту поворота камеры. Из полученного сигнала вычиталось его среднее значение в указанном диапазоне. Обработанные таким образом первичные данные каждого теста формировали выборку, по которой затем проводилась операция усреднения траекторий смещения для всех поворотов и всех испытуемых. Общее количество поворотов камеры в активных навигационных экспериментах для всех испытуемых равно 130. В экспериментах пассивной навигации было зарегистрировано 85 поворотов камеры. Области роста функции на графиках рис. 4 соответствуют согласованию направлений поворота камеры и глаза, т. е. если камера поворачивалась по часовой стрелке – глаз двигался направо, камера поворачивалась против часовой стрелки – глаз поворачивался налево. Области убывания функции на графиках рис. 4 соответствуют разнонаправленным движениям глаза и камеры. Видно, что при активном повороте камеры движения глаз, совпадающие по направлению с вращением камеры, опережают его примерно на 60 мс (рис. 4,а; тренд возрастания начинается до поворота камеры). При пассивном повороте камеры такие движения глаз всегда следовали за ним (тренд возрастания начинается после поворота камеры; см. рис 4,б).

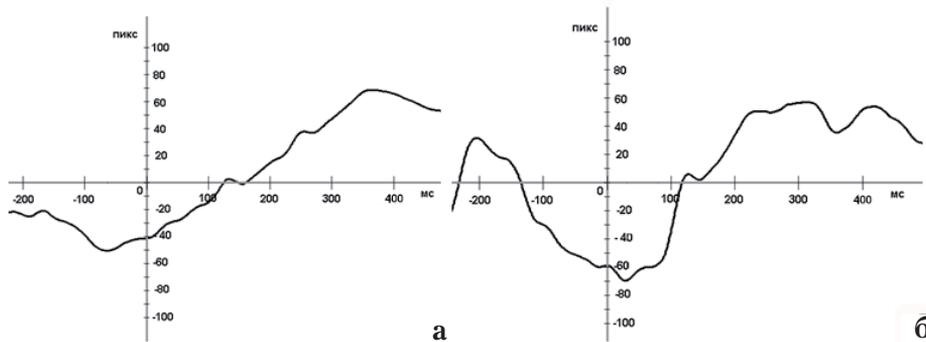


Рис. 4. Усредненные горизонтальные смещения взгляда относительно поворота камеры (положение оси ординат соответствует началу поворота) в условиях активной (а) и пассивной (б) навигации в виртуальной 3D среде. По оси ординат представлена величина смещения глаза в пикселях

Сравнение параметров глазных движений в условиях навигации в виртуальной 3D среде и при просмотре 2D изображений

Обнаружено, что ряд параметров глазных движений существенно различается в тестах навигации в виртуальной 3D среде и при просмотре 2D изображений. Так, средняя амплитуда саккад была значимо (по критерию Стьюдента, $p \leq 0.01$) больше в навигационных тестах по сравнению с просмотром 2D изображений ($4.71 \pm 0.2^\circ$ и $3.3 \pm 0.1^\circ$, $n_1 = 279$ и $n_2 = 794$ соответственно). Найдены различия в частоте возникновения микросаккад: так, в случае осмотра 3D среды лишь 13% фиксаций сопровождались появлением микросаккад; при просмотре 2D изображений количество фиксационных движений, включающих хотя бы одну микросаккаду, оказалось больше и составило 21% от общего количества фиксаций ($p \leq 0.05$). Кроме того, длительность фиксаций взгляда была значимо меньше в условиях навигации в виртуальной 3D среде по сравнению с тестами осмотра 2D изображений (278 ± 11 мс и 347 ± 18 мс соответственно; $n_1 = 87$ и $n_2 = 178$, $p \leq 0.05$).

Между тестами навигации в виртуальной 3D среде и осмотра 2D изображений обнаружены также выраженные различия в амплитуде и пиковой скорости саккад (рис. 5).

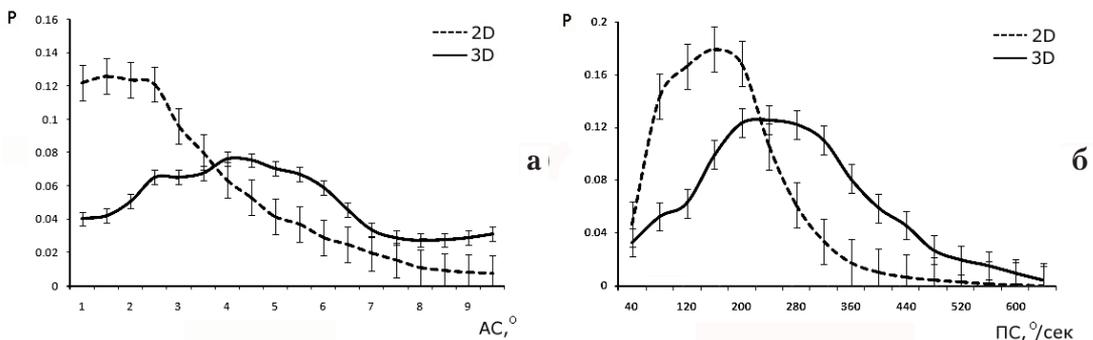


Рис. 5. Распределение амплитуд (а) и пиковой скорости саккад (б) в условиях навигации в виртуальной 3D среде и при просмотре 2D изображений. АС – амплитуда саккад, ПС – пиковая скорость саккад

Видно, что в условиях навигации в виртуальной 3D среде распределение амплитуд и пиковых скоростей саккад имеет более пологий вид, чем при осмотре 2D изображений. При этом средняя пиковая скорость саккад была значимо выше в условиях навигации, чем при осмотре 2D изображений ($260 \pm 8^\circ/\text{с}$ и $157 \pm 3^\circ/\text{с}$ соответственно) ($p \leq 0.01$, по критерию Стьюдента). Как видно из рисунка, характерные особенности движений глаз в условиях навигации в виртуальной 3D среде – широкое распределение амплитуды и пиковой скорости саккад, невыраженность микросаккад и саккад малой амплитуды ($1-2^\circ$).

Для оценки различий пространственных характеристик осмотра 3D динамических сцен и 2D изображений плоскость экрана стимуляционного монитора была разбита на 100 локальных полей размером $2,6 \times 2^\circ$ (рис. 6). На основании усреднения результатов всех испытуемых в каждой области определялась средняя длительность фиксации взгляда. На рисунке наиболее темный цвет соответствует длительности фиксации взгляда 1600 мс и более; зоны, маркированные самым светлым оттенком серого – значениям до 200 мс. Видно, что в условиях активной навигации в виртуальной 3D среде распределение областей с различной длительностью фиксации несколько шире, чем в тестах пассивной навигации. При сравнении с распределением длительностей фиксации в тестах осмотра 2D изображений видно, что площадь «областей повышенного интереса» значительно уменьшается при переходе к 3D динамическим сценам. Эта тенденция свидетельствует об уменьшении времени осмотра периферических областей и о высоком приоритете навигационной задачи.

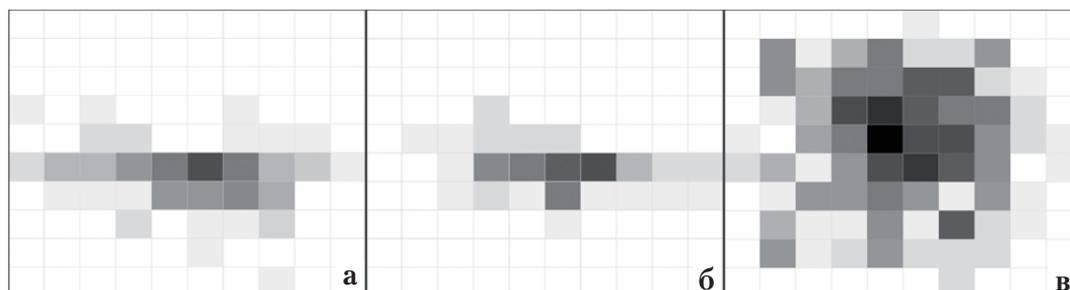


Рис. 6. Пространственное распределение средней суммарной длительности фиксации взгляда в условиях навигации в виртуальной 3D среде (а – активная навигация; б – пассивная навигация) и при осмотре 2D изображений – в

Обсуждение результатов

Основные результаты проведенного исследования состоят в следующем:

1. Следящие движения были более выражены в тестах активной навигации по сравнению с пассивной, а их длительность имела тенденцию к увеличению в первом случае. Напротив, амплитуда и скорость саккад, а также длительность фиксации были сопоставимы в тестах активной и пассивной навигации в виртуальной трехмерной среде.

2. Движения глаз, согласованные с поворотами камеры обзора виртуальной среды, в условиях активной навигации могли опережать поворот, а в условиях пассивной навигации – всегда следовали за поворотом.

3. Длительность фиксации, пространственное распределение длительности фиксации на плоскости изображения, пиковая скорость, амплитуда и длительность саккад, частота возникновения микросаккад по своим характеристикам существенно различаются в тестах навигации в 3D среде и в тестах осмотра двухмерных изображений.



Полученные результаты согласуются с рядом известных сведений, в частности, об особенностях пространственной локализации фиксаций взгляда в исследованиях, направленных на решение частных проблем навигационной задачи (Wiener et al., 2009), и о параметрах глазных движений при осмотре двухмерных изображений (Martinez-Conde et al., 2004).

Исследователи навигационного поведения в естественной среде (Hayhoe, Ballard, 2005) описали особенности захвата фовеальной областью объектов, релевантных решаемой задаче. Такой захват происходит по стратегии «just-in-time» (Ballard et al., 1995), согласно которой фиксации тесно связаны по времени с выполнением определенной поведенческой задачи.

В работе других авторов (Franchak, Adolph, 2010) представлены результаты исследования траектории осмотра реальной среды испытуемыми разного возраста. Среда состояла из комнаты с набором препятствий, которые испытуемые должны были преодолеть. При этом в комнате случайным образом были расположены дополнительные стимулы-аттракторы. Основная закономерность, обнаруженная в этой работе, состоит в том, что при решении задачи необходимость захвата объектов среды фовеальной областью значительно уменьшается с возрастом. Кроме того, длительность фиксаций на препятствиях была значительно меньше, чем на стимулах-аттракторах, что, по мнению авторов, свидетельствует о большой роли периферического зрения при решении навигационных задач. Полученные нами данные о более короткой длительности фиксаций в тестах осмотра виртуальной 3D среды по сравнению с осмотром 2D изображений согласуются с этим выводом.

Согласно нашим результатам, в навигационных тестах длительность фиксаций была в среднем короче, чем в тестах осмотра 2D изображений (278 ± 11 мс и 347 ± 18 мс). Это коррелирует с обратным соотношением амплитуды саккад в этих тестах ($4.7 \pm 0.2^\circ$ и $3.3 \pm 0.1^\circ$). Такая отрицательная корреляция между длительностью фиксаций и амплитудой саккад соответствует известным данным о противофазной временной динамике этих параметров глазных движений при осмотре двухмерных изображений (Унема et al., 2005). Результаты сравнения количества микросаккад по отношению к количеству фиксаций при осмотре 2D изображений и навигации в 3D среде согласуются с известными данными о прямой корреляции между длительностью фиксаций и количеством микросаккад (Rolfs et al., 2008).

В нашем исследовании обнаружена более высокая пиковая скорость саккад в условиях навигации в виртуальной 3D среде, чем при осмотре 2D изображений. Этот факт в сочетании с данными о слабой выраженности саккад малой амплитуды (см. рис. 5) при решении навигационной задачи согласуется с известными данными о положительной корреляции между амплитудой саккад и их скоростью (Bahil, Stark, 1975). В совокупности приведенные данные о скорости и амплитуде саккад, длительности фиксаций, частоте возникновения микросаккад указывают на доминирование механизмов пространственного зрительного внимания (Velichkovskiy et al., 2005; Podladchikova et al., 2009; Laubrock et al., 2010) при решении задач в виртуальной трехмерной среде.

Рассмотрим полученные результаты в контексте процессов зрительного восприятия в условиях навигации в виртуальной 3D среде. Одно из существенных различий в регистрируемых траекториях осмотра 3D объектов при решении навигационной задачи и 2D сцен состоит в пространственной локализации «фокусов внимания» на картах распределения фиксаций взгляда на изображении (темные области на рис. 6).

При осмотре 3D пространства в условиях быстрого движения траектории глазных движений расположены ближе к центру оптической оси виртуальной камеры, совпадающей с вектором ее поступательного движения. Очевидно, преобладание горизонтальных движений глаза связано с особенностями организации поля зрения человека (Шахнович, 1974) и возможностью поворотов камеры только вокруг вертикальной оси. Как в пассивном, так и в активном навигационном эксперименте траектории глазных движений располагаются преимущественно вдоль линии горизонта и приурочены к зонам, свободным для прохождения, что согласуется с известными данными, полученными в условиях эксперимента, моделирующего навигационную задачу (Wiener et al., 2009). В активном навигационном эксперименте общая площадь траекторий осмотра превышала аналогичную площадь осмотра в условиях пассивной навигации и чаще проявлялись диагональные СД, связанные с наблюдением за объектами среды при поступательном движении. Расширение площади осмотра может быть связано с тем, что при активном осмотре среды планирование действий позволяет прогнозировать проекционный вид среды, и навигационно связанные паттерны глазных движений служат лишь для подтверждения прогноза; при этом остается время для свободного осмотра среды. При осмотре 3D пространства в условиях пассивной навигации возможность прогноза отсутствует, поэтому внимание сосредоточено на контроле движения и, соответственно, уменьшается роль осмотра объектов вне зон, свободных для прохождения.

На графике усредненных горизонтальных смещений взгляда, связанных с поворотом камеры в условиях активного навигационного эксперимента (рис. 4,а), имеется тренд смещения центра взгляда, начинающийся за 60 мс до поворота камеры. Совпадение направления движений глаз и управляющей руки (поворот камеры направо осуществлялся нажатием на правую клавишу управления, налево – на левую клавишу) подтверждает полученные ранее данные об использовании копий эффлекторных команд для согласования движений руки и взгляда (Буякас, Гиппенрейтер, 1973). Однако в отличие от этих данных, относящихся к слежению на плоскости, в нашем случае движение глаз могло предшествовать повороту камеры. Возможно, это связано с тем, что при слежении за мишенью, управляемой рукой, глаз должен отслеживать траекторию, заданную рукой, т.е. решать второстепенную задачу, в то время как при решении активной навигационной задачи в 3D среде поворот глаза и управление камерой служат одной цели.

На графике усредненных горизонтальных смещений взгляда, связанных с поворотом камеры в условиях пассивного навигационного эксперимента (рис. 4,б), заметно наличие общего тренда согласованных движений, следующих после поворота. Возможно, эти согласованные движения связаны с выработанным поведенческим стереотипом, синхронизирующим поворотные движения глаз с поворотами корпуса или головы (организма в реальной среде) или аналогичными поворотами виртуальной камеры (в синтезированной среде) при решении навигационной задачи.

Заключение

Исследованы особенности осмотра виртуальной трехмерной среды при решении навигационной задачи и двухмерных изображений. Показано, в частности, что значения амплитуд и пиковых скоростей саккад при осмотре трехмерного пространства движущимся в нем наблюдателем варьируются в более широком диапазоне, чем при осмотре двухмерных изображений. Кроме того, при решении навигационной задачи появляются следящие ком-

пенсаторные движения, которые направлены в противоположную сторону относительно направления поворота виртуальной камеры, и согласованные движения, сонаправленные с поворотами камеры. Такие согласованные движения, по-видимому, связанные с решением навигационной задачи, сравнивались в экспериментах активного (самостоятельного) и пассивного (навязанного) осмотра. Показано, что при активном осмотре согласованные движения глаз могут предвещать поворот камеры (до 60 мс), при пассивном осмотре – следуют за поворотом с латентным периодом порядка 250–550 мс. Особый интерес представляют последовательности следящих движений и возвращающих саккад (пилообразные паттерны глазных движений), которые возникали синхронно с поворотом камеры. Зависимость параметров таких паттернов от специфики виртуальной или реальной среды, характеристик движения в такой среде (скоростей поступательного и вращательного движений), индивидуальных особенностей зрительного внимания испытуемых будет детально исследована на следующем этапе в психофизических экспериментах и модельных исследованиях.

Литература

- Буякас Т. М., Гинтенрейтер Ю. Б.* О некоторых особенностях глазного слежения за самоуправляемой целью // Исследования зрительной деятельности человека. М.: МГУ, 1973. С. 111–142.
- Гибсон Дж.* Экологический подход к зрительному восприятию. М.: Прогресс, 1988.
- Зинченко В. П.* Роль моторных компонентов в процессах восприятия // Образ и деятельность. М.: Изд. «Институт практической психологии»; Воронеж: НПО «МОДЭК», 1997. С. 131–195.
- Найссер У.* Познание и реальность. М.: Прогресс, 1981.
- Шахнович А. Р.* Мозг и регуляция движений глаз. М.: Медицина, 1974.
- Bahill A. T., Stark L.* Overlapping saccades and glissades are produced by fatigue in the saccadic eye movement system // *Experimental Neurology*. 1975. V. 48. № 1. P. 95–106.
- Ballard D., Hayhoe M., Pelz J.* Memory Representations in natural tasks // *Cognitive Neuroscience*. 1995. № 7. P. 66–80.
- Franchak J. M., Adolph K. E.* Visually guided navigation: Head-mounted eye-tracking of natural locomotion in children and adults // *Vision Research*. 2010. № 50. P. 2766–2774.
- Hayhoe M., Ballard D.* Eye movements in natural behavior // *Trends in Cognitive Sciences*. 2005. V. 9. № 4. P. 188–194.
- Henderson J. M.* Human gaze control during real-world scene perception // *Journ. Trends Cogn. Sci.* 2003. №7. P. 498–504.
- Laubrock J., Kliegl R., Rolfs M., Engbert R.* When do microsaccades follow spatial attention? // *Attention, Perception & Psychophysics*. 2010. V. 72. № 3. P. 683–694.
- Martinez-Conde S., Macknik, S. L., Hubel D. H.* The role of saccadic eye movements in visual perception // *Nature Reviews Neuroscience*. 2004. № 5. P. 229–240.
- Podladchikova L. N. et al.* Temporal dynamics of fixation duration, saccade amplitude, and viewing trajectory // *Journ. Int. Neurosci.* 2009. V. 8. № 4. P. 487–501.
- Rolfs M., Laubrock J., Kliegl R.* Microsaccade-induced prolongation of saccadic latencies depends on microsaccade amplitude // *Journ. of Eye Movement Research*. 2008. V. 3. № 1. P. 1–8.
- Steinbach M., Held R.* Eye tracking of observer-generated target movements // *Science*. 1968. V. 161. P. 187.
- Unema P. J. A., Pannasch S., Joos M., Velichkovsky B. M.* Time course of information processing during scene perception: The relationship between saccade amplitude and fixation duration // *Journ. Vis. Cogn.* 2005. №12. P. 473–494.
- Velichkovsky B. M., Joos M., Helmert J. R., Pannasch S.* Two visual systems and their eye movements: Evidence from static and dynamic scene perception // *Proceedings of the XXVII Conference of the Cognitive Science*

Society / Eds. B. G. Bara, L. Barsalou, M. Bucciarelli. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum, 2005. P. 2283–2288.

Wiener J. M., Hölscher C., Buechner S. J., Konieczny L. How the Geometry of Space controls Visual Attention during Spatial Decision Making // Proc. Annual Meeting of the Cognitive Science Society 2009. Amsterdam: 2009. P. 21–23.

FEATURES OF EYE MOVEMENTS DURING THE EXAMINATION OF A DYNAMIC VIRTUAL ENVIRONMENT

KOLTUNOVA T. I., A.B. Kogan Scientific Research Institute of Neurocybernetics, Southern Federal University, Rostov-on-Don

PETRUSHAN M. V., A.B. Kogan Scientific Research Institute of Neurocybernetics, Southern Federal University, Rostov-on-Don

SAMARIN A. I., A.B. Kogan Scientific Research Institute of Neurocybernetics, Southern Federal University, Rostov-on-Don

The differences between trajectories of eye movements during navigation in a 3D virtual environment projected on a screen, and during 2D image viewing are considered in this paper. Two types of the tasks had been used in navigation tests. In the first one subject was navigate in a 3D virtual environment by pressing buttons. In the second the subject watched the environment during imposed motion of the virtual space. Differences between proportions of the fixations and smooth pursuits have been found: in the first type (active control) proportion of smooth pursuits was significantly larger than in the second type (passive control) – 67% and 55%, correspondingly. On the other hand, saccade amplitude, velocity and duration of fixation were similar in navigation tests. Typical patterns linked with camera rotation were revealed. In particular they were different in active and passive navigation tests: in active type, these patterns preceded the rotation, and in second type followed it. Also the movement's properties (fixation duration, spatial distribution of fixation on the image, peak speed and saccade amplitude) were different. Differences of eye movement properties (fixation duration, spatial distribution of fixation on the image, peak speed and saccade amplitude) were found in comparison of navigation tests and 2D image viewing tests.

Keywords: visual perception, navigation, virtual 3D environment, smooth pursuit, fixations, saccades.

Transliteration of the Russian references

Bujakas T. M., Gippenreiter Ju. B. O nekotoryh osobennostjakh glaznogo slezhenija za samoupravljaemoj cel'ju // Issledovanija zritel'noj dejatel'nosti cheloveka. M.: MGU, 1973. S. 111–142.

Gibson Dzh. Jekologicheskij podhod k zritel'nomu vosprijatiju. M.: Progress, 1988.

Zinchenko V. P. Rol' motornyh komponentov v processah vosprijatija // Obraz i dejatel'nost'. M.: Izd. «Institut prakticheskoj psihologii»; Voronezh: NPO «MODJeK», 1997. S. 131–195.

Najsser U. Poznanie i real'nost'. M.: Progress, 1981.

Shahnovich A. R. Mozg i reguljacija dvizhenij glaz. M.: Medicina, 1974.