

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕИНВАЗИВНОГО СЕНСОРНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ

А. С. Буторова^{1,2}, А. П. Сергеев¹

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Устройства, основывающиеся на принципе сенсорного замещения, могут предложить альтернативное зрение людям с нарушениями зрительной сенсорной системы. Устройства сенсорного замещения могут выполнять важную задачу, связанную с самостоятельной навигацией незрячих людей. Эта задача во многом осуществляется благодаря восприятию глубины. Восприятие глубины – это способность человека воспринимать мир в трех измерениях, оценивания расстояние до объектов. Настоящее исследование посвящено изучению восприятия глубины при использовании устройства сенсорного замещения The vOICE у зрячих испытуемых. В качестве пилотажного этапа для участия был привлечен один незрячий испытуемый. Зрячие испытуемые были поделены на две группы: первая группа использовала линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины, вторая группа не использовала линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины; незрячий испытуемый не использовал линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины. Во время тестовых сессий испытуемые должны были локализовать белый пластиковый куб размером 4 x 4 x 4 см³ с помощью The vOICE и заменить его эквивалентным кубом. Тренировочный этап состоял из трех сессий, в ходе которых испытуемые практиковались в локализации и захвате куба с помощью The vOICE. Все экспериментальные группы продемонстрировали снижение абсолютного отклонения в тестовой постсессии эксперимента, что свидетельствует о повышении точности локализации куба. В каждой из двух групп зрячих испытуемых наблюдалось статистически значимое снижение абсолютного отклонения как для тестовых, так и для тренировочных сессий. Незрячий испытуемый в среднем проявил большую тенденцию к повышению точности локализации, чем зрячие испытуемые.

Ключевые слова: сенсорное замещение; нарушения зрения; The vOICE; восприятие глубины; пространственная локализация; точность локализации.

1. Введение

Зрение является доминирующим чувством у зрячих людей и наиболее изученным [1]. Разработки в области восстановления зрения используют неповрежденные сенсорные системы для предоставления информации, которая обычно обрабатывается зрительной сенсорной системой. Термин «сенсорное замещение» был впервые введен в конце 1960-х гг. [2]. Существует два класса устройств сенсорного замещения зрения: тактильные и аудиальные. Тактильные устройства сенсорного замещения манипулируют силой тактильных вибраций (см., например, EyeCane [3]) или ориентацией магнитной стрелки компаса (см., например, тактильный пояс [4]) для передачи информации о расстоянии и относительном расположении объектов в пространстве. Аналогично аудиальные устройства сенсорного замещения, такие как The vOICE [5] и PSVA (Prosthesis for Substitution of Vision by Audition – протез, заменяющий зрение слухом) [6], преобразуют визуальные паттерны в звук в соответствии с определенным алгоритмом и передают их

пользователю в режиме реального времени. Устройство визуально-аудиального сенсорного замещения зрения состоит из видеокамеры, собирающей визуальную информацию об окружающей среде, программного обеспечения, обрабатывающего эту информацию и преобразующего ее в аудиосигнал, и динамика или наушников, воспроизводящих аудиосигнал [7, 8].

Восприятие глубины – одна из важнейших перцептивных функций человека, она имеет решающее значение для преодоления препятствий, которые могут представлять серьезную опасность для людей с нарушениями зрения. Восприятие глубины – это способность воспринимать расстояние до объектов в поле зрения. Восприятие глубины также необходимо для создания трехмерного представления об окружающей среде [9]. У людей восприятие глубины в значительной степени зависит от зрительных способностей [10]. Однако восприятие глубины с помощью технологии сенсорного замещения приближается к зрению: оно основано на тех же визуальных сигналах глубины, собираемых камерой вместо глаз [11,12]. Восприятие глубины требует, чтобы субъекты извлекали и адекватно интерпретировали сигналы глубины [13–15]. Существуют бинокулярные сигналы (бинокулярное несоответствие, аккомодация, конвергенция) и монокулярные сигналы (относительный или знакомый размер, линейная перспектива, параллакс, относительная высота и т. д.).

Авторы [13–15] показали, что визуально-аудиальное сенсорное замещение может обеспечивать восприятие глубины у зрячих людей с завязанными глазами. В работе [16] испытуемые интерпретировали зрительные сигналы глубины и использовали их для локализации объектов с помощью системы сенсорного замещения. Авторы [17] показали, что сенсорное замещение может способствовать развитию восприятия глубины и визуальной перспективы у испытуемых с разным зрительным опытом. Предполагается, что различия в навигации и точности локализации объектов между зрячими и незрячими людьми возникают в основном из-за отсутствия визуальной информации, а не из-за различий, вызванных нарушениями зрения.

В настоящей работе мы воспроизводим экспериментальное исследование [13] с некоторыми модификациями: в настоящем эксперименте принимают участие только зрячие испытуемые; используется технология визуально-аудиального сенсорного замещения The vOICe. Как и в исходном эксперименте, выборка поделена на две группы: первая группа использовала линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины, вторая группа не использовала линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины. Целью настоящей работы стала оценка влияния одного из монокулярных сигналов глубины, линейной перспективы, на точность локализации объекта.

2. Материалы и методы

Экспериментальное исследование проводилось в соответствии с Хельсинкской декларацией, разработанной Всемирной медицинской ассоциацией, которая представляет собой свод этических принципов проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъекта исследования [18]. Перед началом эксперимента в первый день испытуемым предоставлялась основная информация об исследовании (тема, цель, условия участия, процедура, возможные неудобства и риски). Затем они подписывали согласие на участие в исследовании и согласие на обработку персональных данных. Испытуемые были вправе в любое время отказаться от участия в эксперименте без объяснения причин.

Оборудование

Экспериментальное исследование проводилось при помощи стационарного компьютера с техническими характеристиками: процессор Intel Core i5-4670k 3,40 ГГц, видеокарта GeForce GTX 1060 3 Гб, оперативная память 16 Гб с частотой 1333 ГГц;

монитор с разрешением 1920 x 1080 с частотой обновления 144 Гц; матрица дисплея IPS.

Экспериментальная установка состояла из стола (70 x 100 см²), покрытого черной тканью. Рабочая поверхность (60 x 60 см²) была ограничена с трех сторон (слева, спереди и справа) черными стенками. Линейная перспектива была задана вертикальными белыми полосами, расположенными слева и справа от рабочей поверхности (по три с каждой стороны). Каждая из полос потенциально могла использоваться испытуемыми в качестве ориентира для определения местоположения куба. Во время эксперимента велась видеозапись для последующей обработки результатов эксперимента (рис. 1).

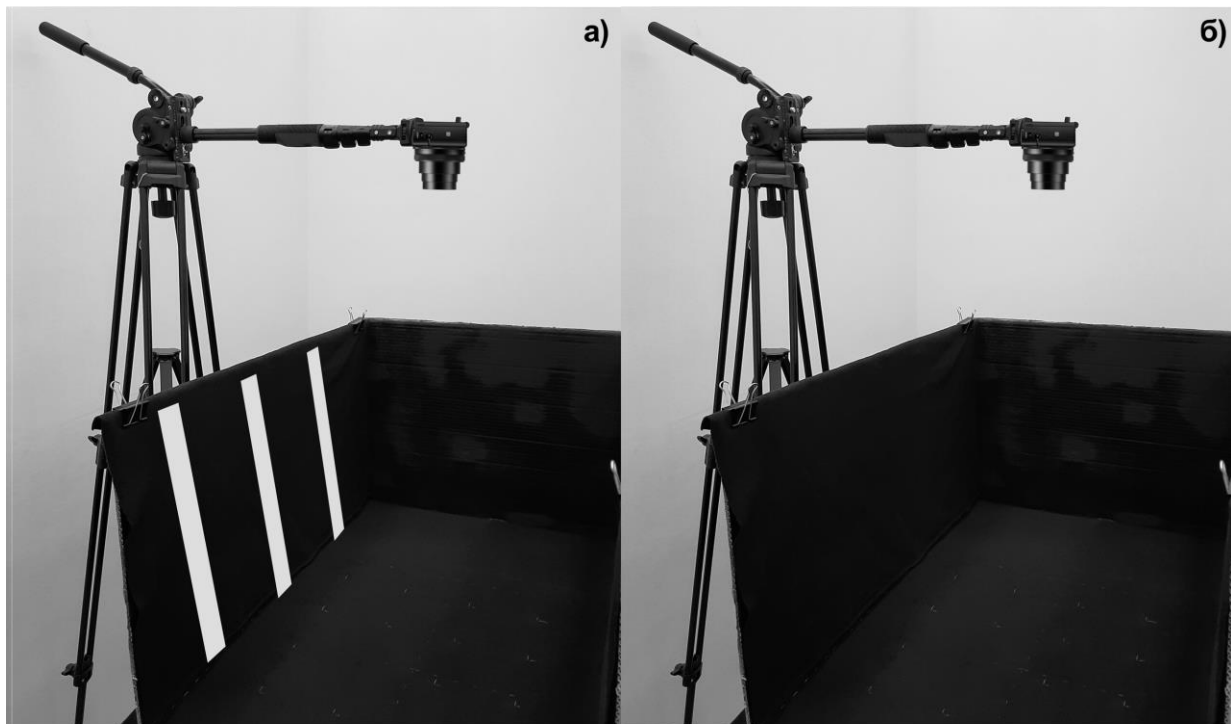


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) экспериментальная установка для группы с линейной перспективой, б) экспериментальная установка для группы без линейной перспективы

В эксперименте использовалась технология визуально-аудиального сенсорного замещения The vOICe для Windows с настройками по умолчанию (разработчик П. Мейер [5]).

Сигнал с веб-камеры Logitech c310, закрепленной на голове испытуемого, передавался на ноутбук через USB-порт. Этот сигнал обрабатывался программой The vOICe. Звуковой ландшафт считывался с аудиоразъема и подавался в Bluetooth гарнитуру JBL Tune 560BT.

Алгоритм преобразования изображения в звук The vOICe получает входные данные с камеры и на их основе создает односекундные «звуковые ландшафты» [5]. Алгоритм сканирует изображения построчно (сверху вниз и слева направо), преобразовывает их в оттенки серого и разделяет на пиксели.

The vOICe использует три правила для преобразования пикселей в звук:

- 1) пиксели в левой части поля зрения воспроизводятся раньше, чем пиксели в правой части поля зрения;
- 2) чем ярче пиксель, тем выше громкость его звучания;
- 3) чем выше пиксель в поле зрения, тем выше высота его звучания.

До эксперимента ни один из испытуемых не использовал технологии сенсорного замещения для локализации объектов или исследования трехмерной (3D) среды.

Процедура эксперимента

Эксперимент состоял из пяти отдельных сессий продолжительностью от 20 до 60 минут каждая: две тестовые сессии (пресессия в 1-й день и постсессия на 5-й день эксперимента) и три тренировочные сессии на 2, 3 и 4-й день эксперимента:

- день 1: тестовая пресессия (40–60 минут);
- день 2: тренировочная сессия (20–40 минут);
- день 3: тренировочная сессия (20–40 минут);
- день 4: тренировочная сессия (20–40 минут);
- день 5: тестовая постсессия (30–40 минут).

Перед каждой сессией проводилась калибровка: экспериментатор помещал куб в центр рабочей поверхности на столе, и испытуемый мог прослушать, как звучит куб, и захватить его.

В первый день эксперимента все испытуемые прошли обучение по использованию технологии The vOICe и тактильно исследовали экспериментальную установку, чтобы получить представление об относительном размере каждой части установки. Никто из участников не видел экспериментальную установку до окончания тестовой постсессии эксперимента.

В ходе эксперимента белый пластиковый куб ($4 \times 4 \times 4 \text{ см}^3$) помещался псевдослучайным образом в одну из двадцати позиций на рабочей поверхности. Каждая сессия состояла из двадцати предъявлений куба. Каждая позиция куба предъявлялась в эксперименте одинаковое число раз. Продолжительность каждого предъявления ограничивалась двумя минутами. После десятого предъявления испытуемым предлагался десятиминутный перерыв.

Испытуемый исследовал статичную сцену посредством движений головы и корпуса. Вставать с места и передвигаться было нельзя.

Экспериментальная задача заключалась в локализации куба с использованием технологии The vOICe. Чтобы определить местоположение куба, испытуемые должны были центрировать куб в поле зрения камеры как по вертикали, так и по горизонтали. В этом случае куб находился прямо перед испытуемым. Центрированный куб звучал в средней тональности в середине звукового ландшафта, кодируемого слева направо.

Инструкция для локализации куба взята из русскоязычной версии учебного пособия по использованию программы The vOICe [19] без существенных изменений: «Для вертикального центрирования необходимо поднять голову вверх и потом наклонить вниз, пока сигнал объекта не зазвучит в среднем тоне (ни высоко, ни низко). Далее, удерживая голову на выбранном уровне, необходимо повернуть ее влево и вправо, пока сигнал не зазвучит через полсекунды от начала звучания “звукового ландшафта”, то есть в горизонтальной середине каждого скана “звукового ландшафта”, продолжительностью в одну секунду... Тогда вы можете протянуть руку и схватить предмет, представляя, что он находится в том направлении, в котором указывает ваш нос».

Тестовые сессии (1-й и 5-й день эксперимента). Во время тестовых сессий экспериментатор устанавливал куб (куб 1) на рабочую поверхность. По команде экспериментатора «Старт» испытуемый приступал к выполнению экспериментальной задачи. Когда испытуемый определял местоположение куба 1, он произносил команду «Стоп». Тогда экспериментатор выключал The vOICe, убирал куб 1 с поверхности стола и по команде «Куб» просил испытуемого установить эквивалентный куб (куб 2) на то место, где, по мнению испытуемого, находился куб 1. Точность локализации в тестовых сессиях оценивалась путем измерения расстояния между положениями куба 1 и куба 2. Расстояние фиксировалось как по оси абсцисс (ширине), так и по оси ординат (глубине).

Тренировочные сессии (2, 3 и 4-й день эксперимента). Во время тренировочных сессий испытуемые практиковались в пространственной локализации куба с помощью The vOICe. По команде экспериментатора «Старт» испытуемый приступал к

выполнению экспериментальной задачи. Когда испытуемый определял местоположение куба, он произносил команду «Стоп», и The vOICe отключался. Затем по команде экспериментатора «Куб» испытуемый должен был накрыть куб ладонью. Точность локализации в тренировочных сессиях оценивалась путем измерения расстояния между положением куба и положением центра ладони испытуемого. Расстояние фиксировалось как по оси абсцисс (ширине), так и по оси ординат (глубине). Предполагалось, что задача на хватание позволит испытуемым откалибровать свое восприятие с помощью технологии сенсорного замещения посредством двигательных и тактильных действий (интермодальных взаимодействий). Во время тренировочных сессий испытуемые получали обратную связь о точности локализации куба для каждого предъявления. Если испытуемые сталкивались с трудностями в локализации куба, экспериментатор корректировал их.

Для оценки динамики точности локализации куба в каждой из двух экспериментальных групп рассчитывались абсолютные отклонения в каждый день эксперимента. Абсолютное отклонение del вычислялось по формуле:

$$del = \sqrt{delX^2 + delY^2}, \quad (1)$$

где $delX$ – отклонение по оси абсцисс (ширине), $delY$ – отклонение по оси ординат (глубине).

Все испытуемые получили сопоставимый опыт работы с The vOICe: у них было одинаковое количество попыток попрактиковаться с технологией сенсорного замещения и одинаковые инструкции по работе с визуальными эффектами, предоставляемыми The vOICe.

После тестовых сессий проводились интервью для сбора впечатлений испытуемых, стратегий и сигналов глубины, использованных для локализации куба.

Участники

В эксперименте приняли участие 32 добровольца с нормальным или скорректированным до нормального зрением (9 мужчин и 23 женщины в возрасте от 18 до 28 лет), на время эксперимента им были завязаны глаза. Испытуемые были отобраны по следующим критериям:

- 1) возраст от 18 до 30 лет;
- 2) отсутствие в анамнезе испытуемого психических или неврологических заболеваний, оказывающих влияние на его когнитивную деятельность;
- 3) нормальное или скорректированное зрение;
- 4) нормальное функциональное состояние (отсутствие переутомления и/или недомогания) по субъективному самоотчету испытуемого.

Выборка была разделена на две группы: первая группа (17 человек) использовала линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины, вторая группа (15 человек) не использовала линейную перспективу как дополнительный сигнал глубины (табл. 1).

Таблица 1. Половозрастные характеристики выборки

	Женщины, чел.	Мужчины, чел.	Средний возраст, лет
Без линейной перспективы, чел.	9	6	24,9
С линейной перспективой, чел.	14	3	20,2
Средний возраст, лет	21,0	22,9	

Эксперимент предполагал участие зрячих испытуемых, однако в качестве пилотажного этапа для участия был привлечен один незрячий испытуемый (мужчина в

возрасте 51 года), который прошел все 5 экспериментальных сессий без линейной перспективы в качестве дополнительного сигнала глубины.

3. Результаты

Исходные (в тестовой пресессии, 1-й день эксперимента) абсолютные отклонения оказались несопоставимы для двух групп зрячих испытуемых (группа без линейной перспективы: 120,2 мм; группа с линейной перспективой: 147,7 мм). Поэтому абсолютные отклонения в первый и пятый день в этих двух группах не сравнивались.

Было проведено внутригрупповое сравнение абсолютных отклонений в тестовых пре- и постсессиях для зрячих испытуемых (рис. 2). В каждой из групп наблюдалась значительная разница в абсолютных отклонениях между 1-м и 5-м экспериментальным днем (группа без линейной перспективы: p -значение = 0,020, критерий Уилкоксона; группа с линейной перспективой: p -значение = 0,002, критерий Уилкоксона). Для группы с линейной перспективой абсолютное отклонение оказалось больше, чем для группы без линейной перспективы как в 1-й, так и в 5-й день эксперимента. Скорость снижения абсолютного отклонения для группы с линейной перспективой была несколько выше, чем для группы без линейной перспективы, хотя различие между группами незначительное (рис. 2).

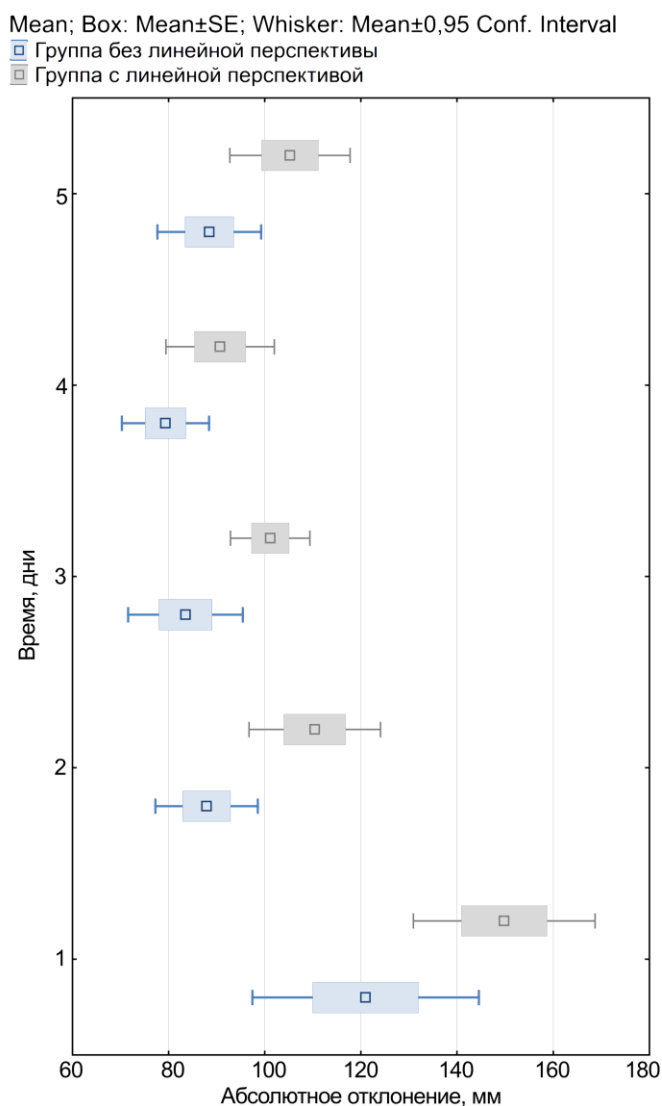


Рис. 2. Абсолютное отклонение для зрячих участников

Распределение ошибок в тестовой постсессии эксперимента было примерно одинаковым для двух групп зрячих испытуемых. Ближайший ряд распознавался

лучше, чем последние ряды (рис. 3). Размер эффекта вычислялся как разность между абсолютным отклонением в тестовой постсессии и абсолютным отклонением в тестовой сессии. Для обеих групп размеры эффекта в среднем были отрицательными.

Испытуемые были склонны чаще переоценивать расстояние до куба по глубине, чем недооценивать это расстояние. В среднем обе группы склонны переоценивать расстояние по глубине больше, чем по ширине. Однако переоценка по ширине и глубине у группы с линейной перспективой была больше, чем у группы без линейной перспективы (р-значение $\ll 0,050$, критерий Манна – Уитни).

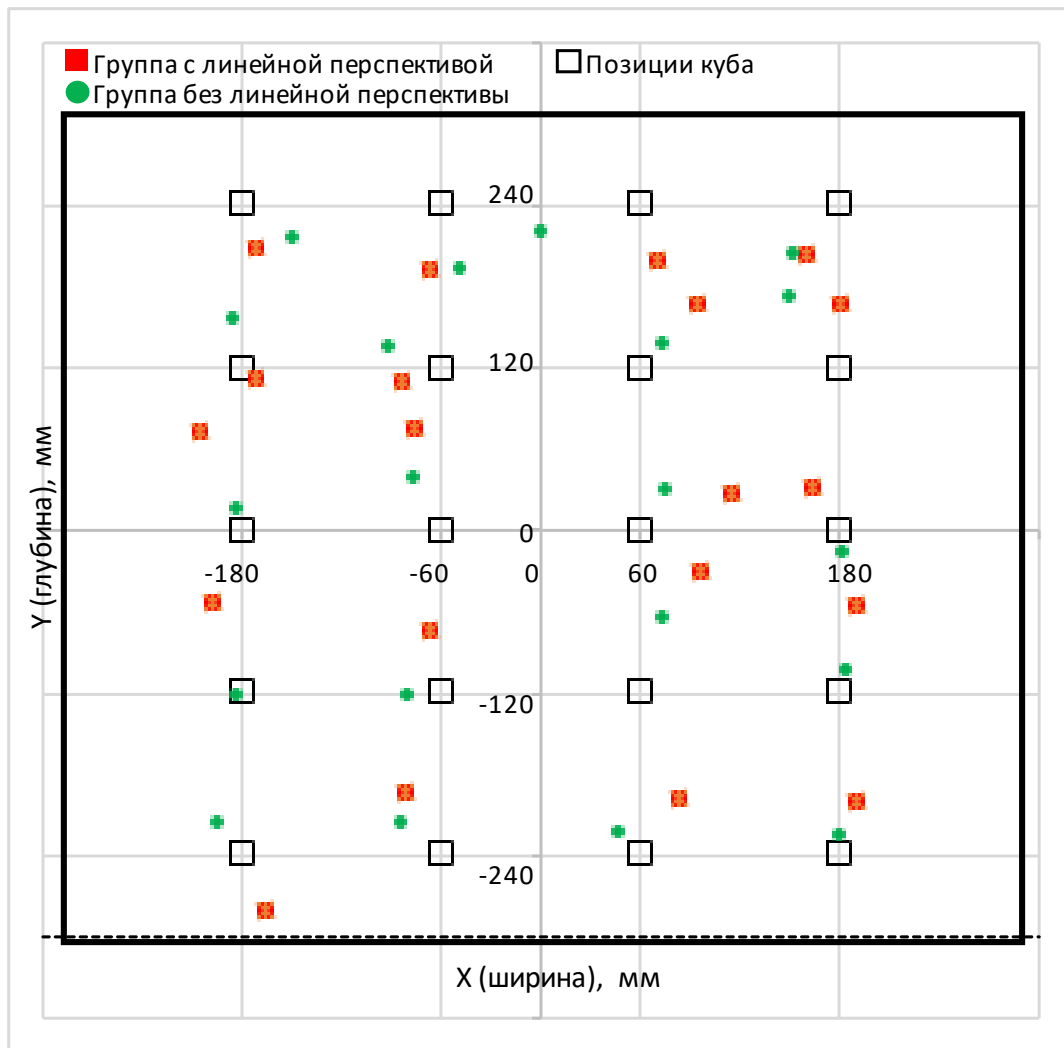


Рис. 3. Абсолютное отклонение от каждой позиции для зрячих участников

Результаты незрячего испытуемого сравнивались с результатами зрячей группы без линейной перспективы. Несмотря на то что полученные результаты не имеют статистической значимости, наблюдается устойчивая тенденция к снижению ошибки локализации у зрячей группы и незрячего испытуемого. Незрячий испытуемый имел изначально более низкое абсолютное отклонение по сравнению с группой зрячих испытуемых. Незрячий испытуемый в среднем показал меньшее абсолютное отклонение, чем группа зрячих испытуемых. В тренировочном этапе эксперимента незрячий испытуемый проявил большую тенденцию к повышению точности локализации, чем зрячая группа: для зрячей группы разность между отклонениями в первой и третьей тренировочных сессиях составила 8 мм, для незрячего испытуемого – 30 мм (рис. 4).

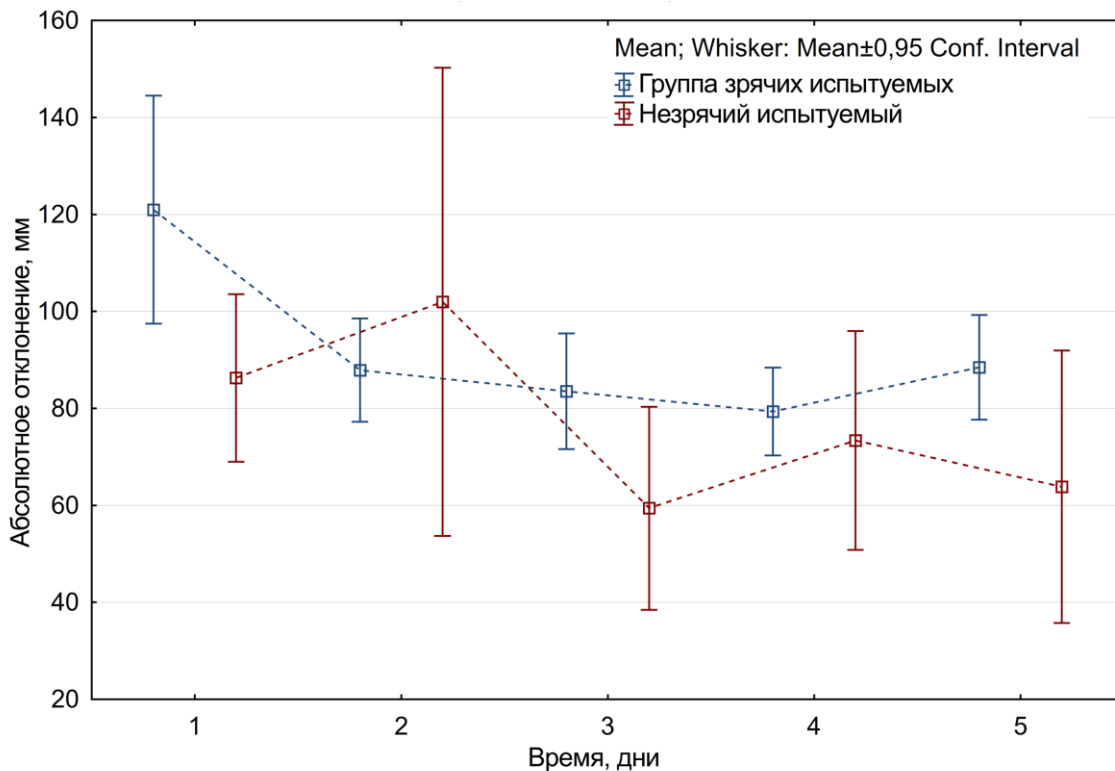


Рис. 4. Абсолютное отклонение для участников без линейной перспективы

Интервью после посттестовой оценочной сессии показали, что большинство испытуемых не использовали линейную перспективу в качестве дополнительного сигнала глубины. Часть испытуемых отметила, что вертикальные полосы не облегчали локализацию куба, а препятствовали ей.

4. Обсуждение

Все экспериментальные группы продемонстрировали положительную динамику при работе с устройством сенсорного замещения The vOICE. В каждой из двух групп зрячих испытуемых наблюдалось статистически значимое снижение среднего отклонения, что свидетельствует о повышении точности локализации куба. В эксперименте принял участие только один незрячий испытуемый, однако у него также наблюдалось повышение точности локализации к пятому дню эксперимента. Эти результаты согласуются с многочисленными исследованиями, которые показали, что с количеством тренировок у людей, не имевших ранее опыта взаимодействия с технологией сенсорного замещения, возрастает точность распознавания и локализации объектов в поле зрения [20].

Наличие линейной перспективы в поле зрения незначительно повлияло на динамику обучения использованию технологии сенсорного замещения, что согласуется с работой [13]. Наличие линейной перспективы не повлияло на точность пространственной локализации куба, что, напротив, расходится с результатами, полученными в работе [13]. Предположительно, в настоящей экспериментальной работе вертикальные полосы, задающие линейную перспективу, были скорее помехой, чем подсказкой.

В обеих группах зрячих испытуемых наблюдалось одинаковое распределение ошибок. Переоценка и недооценка расстояния до куба были ниже для первых рядов рабочей поверхности и выше для последних. При этом в обеих группах в среднем переоценка была больше по глубине, чем по ширине. Эти данные согласуются с теорией формы поля зрения человека, согласно которой форма поля зрения человека представляется в виде овала с более длинными горизонтальными осями [21].

Восприятие глубины за счет сенсорного замещения можно улучшить, внедряя методы обработки сигналов. Несколько способов улучшения восприятия глубины с помощью визуально-аудиального сенсорного замещения показаны, например, в [10]. Таким образом, вопрос изучения восприятия глубины для последующего развития систем сенсорного замещения представляется авторам актуальным.

В настоящей работе для упрощения процедуры набора участников и проведения эксперимента было принято решение набирать участников с нормальным или скорректированным до нормального зрением. Сложность набора незрячих участников заключается в возрастном разбросе, разном зрительном опыте, приобретенном участниками до потери зрения, малой мобильности. В будущем авторы планируют расширить выборку незрячих испытуемых для достижения статистически значимых результатов.

5. Выводы

1. Все экспериментальные группы продемонстрировали снижение абсолютного отклонения, что свидетельствует о повышении точности локализации. При этом в каждой из двух групп зрячих испытуемых наблюдалось статистически значимое снижение абсолютного отклонения.

2. Наличие линейной перспективы в поле зрения незначительно повлияло на динамику обучения использованию технологии сенсорного замещения.

3. Обе группы были склонны переоценивать расстояние по глубине больше, чем расстояние по ширине.

6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

7. Список литературы

1. *Howard, I. P.* Seeing in Depth. Volume I: Basic Mechanisms / I. P. Howard. – Toronto, Canada: University of Toronto Press, 2002. – P. 650. – ISBN 0973087307.
2. Vision substitution by tactile image projection / P. Bach-y Rita, C. C. Collins, F. Saunders [et al.] // *Nature*. – 1969. – Vol. 221. – P. 963–964.
3. Increasing accessibility to the blind of virtual environments, using a virtual mobility aid based on the «EyeCane»: Feasibility study / S. Maidenbaum, S. Levy-Tzedek, D.-R. Chebat, A. Amedi // *PLoS one*. – 2013. – Vol. 8, № 8. – P. e72555.
4. Beyond sensory substitution – learning the sixth sense / S. K. Nagel, C. Carl, T. Kringe [et al.] // *J. of Neural Engineering*. – 2005. – Vol. 2(4). – P. R13–R26.
5. *Meijer, P. B.* An experimental system for auditory image representations / P. B. Meijer // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 1992. – Vol. 39, No 2. – P. 112–121. – DOI 10.1109/10.121642.
6. A real time experimental prototype for enhancement of vision rehabilitation using auditory substitution / C. Capelle, C. Trullemans, P. Arno, C. Veraart // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 1998. – Vol. 45. – P. 1279–1293. – DOI 10.1109/10.720206.
7. EyeMusic: Introducing a «visual» colorful experience for the blind using auditory sensory substitution / S. Abboud, S. Hanassy, S. Levy-Tzedek [et al.] // *Restor. Neurol. Neurosci.* – 2014. – Vol. 32(2). – P. 247–257. – DOI 10.3233/RNN-130338.
8. *Auvray, M.* Multisensory and spatial processes in sensory substitution / M. Auvray // *Restor. Neurol. Neurosci.* – 2019. – Vol. 37, No. 6. – P. 609–619. – DOI 10.3233/RNN-190950.
9. *Tovee, M.* An Introduction to the Visual System Second edition / M. Tovee. – New York: Cambridge University Press, 2008. – P. 212.

10. Klerk, J. C. Investigating techniques for gaining depth perception using visual-to-auditory sensory substitution / J.C. Klerk, D. Vogts, J. Wesson // Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists. – 2020. – P. 141–148.
11. O'Regan, J. K. Sensorimotor account of vision and visual consciousness / J. K. O'Regan, A. A. Noe // Behav. Brain. Sci. – 2001. – Vol. 24(5). – P. 939–973. – DOI 10.1017/S0140525X01000115.
12. Ward, J. Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device / J. Ward, P. B. Meijer // Conscious. Cogn. – 2010. – Vol. 19(1). – P. 492–500. – DOI 10.1016/j.concog.2009.10.006.
13. Renier, L. Vision substitution and depth perception: Early blind subjects experience visual perspective through their ears / L. Renier, A. G. De Volder // Disabil. Rehabil.: Assist. Technol. – 2010. – Vol. 5(3). – P. 175–183. – DOI 10.3109/17483100903253936.
14. Neural substrates for depth perception of the Necker cube; a functional magnetic resonance imaging study in human subjects / T. Inui, S. Tanaka, T. Okada [et al.] // Neurosci. Lett. – 2000. – Vol. 282(3). – P. 145–148. – DOI 10.1016/s0304-3940(00)00899-5.
15. Cortical areas related to attention to 3D surface structures based on shading: an fMRI study / M. Taira, I. Nose, K. Inoue, K. Tsutsui // Neuroimage. – 2001. – Vol. 14. – P. 959–966. – DOI 10.1006/nimg.2001.0895.
16. Renier, L. Cognitive and brain mechanisms in sensory substitution of vision: a contribution to the study of human perception / L. Renier, A. G. De Volder // J. Integr. Neurosci. – 2005. – Vol. 4, No. 4. – P. 489–503. – DOI 10.1142/S0219635205000999.
17. Cross-modal activation of visual cortex during depth perception using auditory substitution of vision / L. Renier, O. Collignon, C. Poirier [et al.] // Neuroimage. – 2005. – Vol. 26. – P. 573–580. – DOI 10.1016/j.neuroimage.2005.01.047.
18. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects // Bulletin of the World Health Organization. – 2001. – Vol. 79 (4). – P. 373 – 374. – URL <https://apps.who.int/iris/handle/10665/268312>. (дата обращения: 02.03.2023)
19. The vOICe Training Manual. – URL: https://www.seeingwithsound.com/manual_ru/The_vOICe_Training_Manual_ru.htm. (дата обращения: 12.04.2023)
20. A self-training program for sensory substitution devices / G. Buchs, B. Haimler, M. Kerem [et al.] // PLoS One. – 2021. – Vol. 16(4). – P. e0250281. – DOI 10.1371/journal.pone.0250281.
21. Künnapas, T. M. The vertical-horizontal illusion and the visual field / T. M. Künnapas // J. Exp. Psychol. – 1957. – Vol. 53 (6). – P.405–407. – DOI 10.1037/h0048637.

Сведения об авторах:

Буторова Анастасия Сергеевна, инженер-исследователь лаборатории физики и экологии Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия; аспирант, младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета, Екатеринбург, Россия. Эл. почта: a.s.butorova@urfu.ru.

Сергеев Александр Петрович, к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией физики и экологии Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

EXPERIENCE OF USING NON-INVASIVE SENSORY SUBSTITUTION IN LOCALIZATION OF OBJECTS IN SPACE

A. S. Butorova^{1,2}, A. P. Sergeev¹

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Devices based on the principle of sensory substitution may offer alternative vision for people with visual impairments. Sensory substitution devices are able to perform an important task related to the self-navigation of visually impaired people. This task is largely accomplished through depth perception. Depth perception is the ability of a person to perceive the world in three dimensions, estimating the distance to objects. The present study is devoted to the study of depth perception using the sensory substitution device The vOICe in sighted subjects. As a pilot stage, one blind subject was involved in the experiment. The sighted subjects were divided into two groups: the first group used linear perspective as an additional depth signal, the second group did not use linear perspective as an additional depth signal; the blind subject did not use linear perspective as an additional depth signal. During pre- and post-test evaluation sessions, subjects had to localize a 4 x 4 x 4 cm³ white plastic cube using The vOICe and replace it with an equivalent cube. The training phase consisted of three sessions during which subjects practiced in localizing and capturing a cube using The vOICe. All experimental groups demonstrated a decrease in the absolute deviation in the post-test experimental session, which indicates an increase in the accuracy of the cube localization. In each of the two groups of sighted subjects, there was a statistically significant reduction in the absolute deviation for both evaluation and training sessions. The blind subject, on average, showed a greater tendency to improve localization accuracy than the sighted subjects.

Key words: sensory substitution; visual impairment; The vOICe; depth perception; spatial localization; localization accuracy.

References

1. Howard, I. P. Seeing in Depth. Volume I: Basic Mechanisms / I. P. Howard. – Toronto, Canada: University of Toronto Press, 2002. – P. 650. – ISBN 0973087307.
2. Vision substitution by tactile image projection / P. Bach-y Rita, C. C. Collins, F. Saunders [et al.] // Nature. – 1969. – Vol. 221. – P. 963–964.
3. Increasing accessibility to the blind of virtual environments, using a virtual mobility aid based on the «EyeCane»: Feasibility study / S. Maidenbaum, S. Levy-Tzedek, D.-R. Chebat, A. Amedi // PLoS one. – 2013. – Vol. 8, № 8. – P. e72555.
4. Beyond sensory substitution – learning the sixth sense / S. K. Nagel, C. Carl, T. Kringe [et al.] // J. of Neural Engineering. – 2005. – Vol. 2(4). – P. R13–R26.
5. Meijer, P. B. An experimental system for auditory image representations / P. B. Meijer // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1992. – Vol. 39, No 2. – P. 112–121. – DOI 10.1109/10.121642.
6. A real time experimental prototype for enhancement of vision rehabilitation using auditory substitution / C. Capelle, C. Trullemans, P. Arno, C. Veraart // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1998. – Vol. 45. – P. 1279–1293. – DOI 10.1109/10.720206.
7. EyeMusic: Introducing a «visual» colorful experience for the blind using auditory sensory substitution / S. Abboud, S. Hanassy, S. Levy-Tzedek [et al.] // Restor. Neurol. Neurosci. – 2014. – Vol. 32(2). – P. 247–257. – DOI 10.3233/RNN-130338.
8. Auvray, M. Multisensory and spatial processes in sensory substitution / M. Auvray // Restor. Neurol. Neurosci. – 2019. – Vol. 37, No. 6. – P. 609–619. – DOI 10.3233/RNN-190950.
9. Tovee, M. An Introduction to the Visual System Second edition / M. Tovee. – New York: Cambridge University Press, 2008. – P. 212.

10. *Klerk, J. C.* Investigating techniques for gaining depth perception using visual-to-auditory sensory substitution / J.C. Klerk, D. Vogts, J. Wesson // Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists. – 2020. – P. 141–148.
11. *O'Regan, J. K.* Sensorimotor account of vision and visual consciousness / J. K. O'Regan, A. A. Noe // *Behav. Brain. Sci.* – 2001. – Vol. 24(5). – P. 939–973. – DOI 10.1177/S0140525X01000115.
12. *Ward, J.* Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device / J. Ward, P. B. Meijer // *Conscious. Cogn.* – 2010. – Vol. 19(1). – P. 492–500. – DOI 10.1016/j.concog.2009.10.006.
13. *Renier, L.* Vision substitution and depth perception: Early blind subjects experience visual perspective through their ears / L. Renier, A. G. De Volder // *Disabil. Rehabil.: Assist. Technol.* – 2010. – Vol. 5(3). – P. 175–183. – DOI 10.3109/17483100903253936.
14. Neural substrates for depth perception of the Necker cube; a functional magnetic resonance imaging study in human subjects / T. Inui, S. Tanaka, T. Okada [et al.] // *Neurosci. Lett.* – 2000. – Vol. 282(3). – P. 145–148. – DOI 10.1016/S0304-3940(00)00899-5.
15. Cortical areas related to attention to 3D surface structures based on shading: an fMRI study / M. Taira, I. Nose, K. Inoue, K. Tsutsui // *Neuroimage.* – 2001. – Vol. 14. – P. 959–966. – DOI 10.1006/nimg.2001.0895.
16. *Renier, L.* Cognitive and brain mechanisms in sensory substitution of vision: a contribution to the study of human perception / L. Renier, A. G. De Volder // *J. Integr. Neurosci.* – 2005. – Vol. 4, No. 4. – P. 489–503. – DOI 10.1142/S0219635205000999.
17. Cross-modal activation of visual cortex during depth perception using auditory substitution of vision / L. Renier, O. Collignon, C. Poirier [et al.] // *Neuroimage.* – 2005. – Vol. 26. – P. 573–580. – DOI 10.1016/j.neuroimage.2005.01.047.
18. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects // *Bulletin of the World Health Organization.* – 2001. – Vol. 79 (4). – P. 373 – 374. – URL <https://apps.who.int/iris/handle/10665/268312> (accessed: 02.03.2023).
19. The vOICe Training Manual. – URL: https://www.seeingwithsound.com/manual_ru/The_vOICe_Training_Manual_ru.htm (accessed: 12.04.2023)
20. A self-training program for sensory substitution devices / G. Buchs, B. Haimler, M. Kerem [et al.] // *PLoS One.* – 2021. – Vol. 16(4). – P. e0250281. – DOI 10.1371/journal.pone.0250281.
21. *Künnapas, T. M.* The vertical-horizontal illusion and the visual field / T. M. Künnapas // *J. Exp. Psychol.* – 1957. – Vol. 53 (6). – P.405–407. – DOI 10.1037/h0048637.