

Научная статья

УДК 630.935.1

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.61>

EDN: WSORUK

Оценка точности решения простейших сенсорно-когнитивных задач оператором эргатических систем

И. С. Стешин, И. В. Петухов[✉], Л. А. Стешина, И. О. Танрывердиев

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
PetuhovIV@volgatech.net[✉]

Аннотация. *Введение.* Использование тренажёрных комплексов и симуляторов рассматривается сегодня в качестве эффективного средства подготовки операторов сложных технологических комплексов. При этом наблюдается широкое расхождение в составе используемых технических средств тренажёрных комплексов, что ставит вопрос о зависимости результатов обучения от используемых технологий. *Цель* – оценка точности решения простейших сенсорно-когнитивных задач, значимых для эффективной профессиональной деятельности, в условиях восприятия информации в виртуальных средах и при восприятии информации с электронных дисплеев. Проверялась гипотеза о зависимости результатов решения сенсорно-когнитивных задач в зависимости от используемой технологии представления информации. *Объектом* являются простейшие сенсорно-когнитивные задачи на основе оценки центра масс геометрических объектов. Данная задача выбрана как типовая для операторов, связанных с погрузочно-разгрузочными работами, включающая сенсорную компоненту в части оценки геометрических форм и когнитивную компоненту. *Методы* решения задачи сводятся к использованию методов кластерного анализа, включая методы понижения размерности t-SNE, а также метод машинного обучения без учителя k-means, позволяющие выявить закономерности результатов эксперимента. *Результаты.* В ходе анализа статистически значимых различий в результатах измерения как точности восприятия размеров и форм геометрических объектов, так и скорости этого процесса при различных способах отображения видеоинформации оператору обнаружить не удалось, что свидетельствует о том, что способ предъявления информации на результаты не влияет. *Выводы.* Установлено, что погружение в виртуальные среды не оказывает существенного как негативного, так и позитивного эффекта на точность восприятия геометрических размеров и форм объектов оператором. Учитывая прочие преимущества виртуальных сред, можно предполагать, что обучение операторов манипуляторов задачам наведения в виртуальных средах будет иметь незначительные преимущества по сравнению с обучением их в симуляторах на основе электронных дисплеев, прежде всего, возможно за счёт некоторого элемента новизны.

Ключевые слова: человеко-машинное взаимодействие; профессиональная подготовка; тренажёры; виртуальная среда; симулятор

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00568 «Методы и интеллектуальная система поддержки динамической устойчивости операторов эргатических систем», <https://rscf.ru/project/23-19-00568/>.

Для цитирования: Оценка точности решения простейших сенсорно-когнитивных задач оператором эргатических систем / И. С. Стешин, И. В. Петухов, Л. А. Стешина и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 4 (64). С. 61–73. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.61>; EDN: WSORUK

Введение

Несмотря на активное внедрение систем автоматизации и интеллектуализации в технологические процессы, человек-

оператор зачастую остаётся ключевым элементом системы управления. Повышение надёжности человека-оператора и его производительности является главным

фактором обеспечения эффективного функционирования производственной системы. Кроме того, именно человек-оператор является главным источником внештатных и аварийных ситуаций [1].

Решение проблемы может быть в плоскости профессиональной подготовки операторов [2, 3], определяющей последующую производительность человеко-машинной системы, а также количество нарушений технологического процесса, допущенных по вине оператора [4].

Описаны идеи фиксации индивидуальных стилей работы операторов харвестеров, которые позволяют во время обучения провести их корректировку, повышая производительность технологической системы [5].

Также хорошо известно, что квалификация операторов ключевым образом влияет на эффективность работы самой технологической системы [6, 7].

Применение тренажёров и симуляторов может значительно интенсифицировать процесс подготовки высококвалифицированных операторов [8]. Однако встаёт вопрос применимости тех или иных технологий, используемых при подготовке операторов, в том числе таких технологий, как виртуальная реальность, иммерсивные технологии погружения и т. д.

Целью статьи является оценка точности решения отдельных операторских задач, значимых для эффективной профессиональной деятельности, в условиях восприятия информации в виртуальных средах и при восприятии информации с электронных дисплеев.

Теоретический анализ

Наряду с обучающими симуляторами технологических процессов, основанными на трёхмерном представлении объектов на электронных дисплеях, технологии дополненной и виртуальной реальности в настоящее время активно используются для создания иммерсивных обучающих сред в симуляторах сложных технологических процессов. Считается, что применение виртуальных сред в процессе под-

готовки и переподготовки операторов, согласно результатам современных исследований, позволяет в значительной степени сократить время подготовки операторов, снизить количество ошибок неопытных операторов после процесса обучения, сократить материальные расходы на подготовку операторов.

Так, например, исследования процесса подготовки операторов лесозаготовительной техники показывают, что добавление 25 часов практического обучения в виртуальной реальности увеличивает объём заготовленной древесины на 23 % и снижает на 26 % расходы на ремонт и техническое обслуживание в течение первого месяца работы в лесу [9].

Однако большинство известных исследований с использованием симуляторов лесозаготовительной техники направлено на отработку навыков последовательности выполнения действий и навыков взаимодействия с технологическим оборудованием [10, 11].

На сегодня принято считать, что типовой процесс профессиональной деятельности оператора состоит из отдельных этапов, включающих сенсорную, когнитивную и моторную компоненты. Восприятие времени и пространства является одним из наиболее сложных процессов, затрагивающих как сенсорную, так и когнитивную и моторную компоненты. Это достаточно сложная функция оператора, связанная с осуществлением какого-либо управления, предполагающего обратную связь: например, наведения подвижного рабочего органа объекта управления на визуально определяемую цель.

Такие процессы типичны также при осуществлении погрузочных работ – при использовании форвардера эффективность профессиональной деятельности зависит как от восприятия геометрических размеров сортиментов (брёвен), так и от правильного наведения захватного устройства на определённую оператором визуальную цель. Правильный захват пачек брёвен при погрузке их в грузовой

отсек форвардера обеспечивает меньшую раскачку захватного устройства и меньший перекося пачки брёвен при переносе захватным устройством [12].

Согласно технологической инструкции, оператору лесозаготовительной машины требуется захватить пачку из лежащих на земле брёвен (сортиментов) таким образом, чтобы центр масс этой пачки находился в точке захвата пачки захватным устройством, рис. 1, а. Перекося точки захвата относительно центра масс пачки брёвен влечёт неправильную погрузку брёвен, их повреждения в процессе погрузки, а также создаёт чрезмерные нагрузки на технологическое оборудование, рис. 1, б.



а



б

Рис. 1. Захват брёвен при погрузке:
а – верный, б – не верный

Fig. 1. Grasping logs during loading:
a – correct, b – incorrect

Аналогичная ситуация наблюдается и для операторов харвестеров. Установлено, что именно высокая точность позиционирования харвестерных головок и захватов позволяет предотвратить повреждения древесины в процессе лесозаготовки и погрузки брёвен в транспортную машину [13]. При этом точность позиционирования таких рабочих механизмов определяется именно сенсомоторной реакцией восприятия геометрической формы, выработки

решения и осуществления этого решения оператором с помощью устройств ввода.

В качестве устройств ввода в подавляющем большинстве систем автоматизированного управления подвижными объектами и манипуляторами являются джойстики или их разновидности. Процесс осуществления управления с помощью джойстиков в виртуальных средах также имеет ряд особенностей, которые являются предметом рассмотрения отдельных исследований. В данном исследовании проводились эксперименты именно по восприятию форм, а в качестве устройств наведения (выработки решения) использовались стандартные джойстики. По мнению авторов, это является справедливым подходом, поскольку большинство реального технологического оборудования оснащено физическими джойстиками, а не графическими элементами управления. Более того, согласно исследованиям, применение реальных джойстиков вместо элементов графического интерфейса в системах управления оправдано. Операторы демонстрируют большую точность управления механизмами при наличии тактильной обратной связи, т. е. при наличии именно физических, реальных джойстиков [14].

Безусловно на точность восприятия геометрических размеров и форм объектов в виртуальных средах влияет качество отображения визуальной информации человеку. Так проводились эксперименты по изучению разницы в восприятии размеров и форм геометрических объектов в виртуальных средах при использовании различных шлемов виртуальной реальности, доступных сейчас в продаже в мире. Исследователи не обнаружили существенной разницы в восприятии размеров и форм объектов при использовании разных типов шлемов и пришли к выводу, что потребительские гарнитуры виртуальной реальности обеспечивают достаточно высокую степень точности восприятия расстояний, размеров и форм объектов, чтобы их можно было уверенно использо-

вать в будущей экспериментальной науке о зрении и других исследовательских приложениях в области психологии [15].

В других экспериментах исследованы различия в восприятии расстояний в физическом мире и в виртуальных средах. Установлено, что на точность восприятия пространственной информации в виртуальных средах в значительной мере влияет опыт погружения человека в виртуальные среды. При этом, с появлением опыта работы в виртуальных средах зрительный анализатор человека «калибруется» или адаптируется к новым условиям восприятия информации и точность восприятия становится выше. В частности, установлено, что перемещение или «ходьба» по виртуальной среде ускоряют эти процессы адаптации [16].

В нескольких исследованиях отмечается, что абсолютная ошибка восприятия геометрии увеличивается по мере увеличения расстояния от наблюдателя в виртуальной среде [17].

Исследованы и классифицированы факторы, влияющие на восприятие геометрии и глубины при восприятии информации с дисплея (монокулярные факторы) и в виртуальных средах (бинокулярные факторы) [18].

Установлено также, что индивидуальные параметры настройки гарнитур виртуальной реальности, а именно неверная настройка фокусного расстояния, могут в значительной степени влиять на точность восприятия геометрии в виртуальных средах [19].

На восприятие геометрических форм и размеров помимо способа отображения информации человеку также влияет и положение тела оператора в пространстве. Это объясняется тем, что человек при восприятии размеров и форм геометрических объектов ориентируется, по большей части, на визуальную информацию, но, в некоторой степени, и на вестибулярное чувство [20, 21].

В данной работе экспериментально сравнивалась точность восприятия разме-

ров и форм геометрических объектов оператором в условиях восприятия информации в виртуальных средах и при восприятии информации с электронных дисплеев. Данные о различиях в точности восприятия размеров и форм геометрических объектов в различных условиях отображения визуальной информации оператору позволят дать рекомендации по разработке новых симуляторов для операторов лесозаготовительной, строительной техники, водителей автомобильного транспорта.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 98 мужчин добровольцев в возрасте 19–23 лет – студентов учебного заведения, занимающегося профессиональной подготовкой операторов лесозаготовительной техники. Все добровольцы предварительно медицинскими работниками были сгруппированы в три группы отбора по здоровью с учётом индивидуальных особенностей зрения и здоровья опорно-двигательного аппарата и прошли предварительное тестирование на профессиональную пригодность к осуществлению операторской деятельности при поступлении в учебное заведение. При этом все добровольцы не имели явных проблем со здоровьем, которые бы не позволяли им выполнять операторскую деятельность по управлению лесозаготовительной техникой. Все 98 добровольцев были поделены на две эквивалентно сбалансированные группы тестирования (табл. 1).

Таблица 1. Распределение людей с разными группами профессионального отбора по группам тестирования

Table 1. Distribution of people from different vocational selection groups into the testing groups

Группа тестирования	Группа отбора	Количество человек
Виртуальная реальность	I	17
	II	28
	III	4
Графический дисплей	I	18
	II	27
	III	4

Первая группа добровольцев выполняла тестирование точности восприятия размеров и форм геометрических объектов в условиях восприятия зрительной информации с электронного дисплея. Вторая группа добровольцев выполняла аналогичное тестирование точности восприятия размеров и форм геометрических объектов в условиях виртуальной среды.

Техническое обеспечение виртуальной среды было организовано на основе системы виртуальной реальности HTC VIVE 2, включающей шлем виртуальной реальности, базовые станции для отслеживания перемещения оператора в виртуальной среде и специализированного программного обеспечения. Согласно результатам предыдущих исследований, выбор конкретного типа гарнитуры виртуальной реальности не имеет решающего значения с точки зрения точности восприятия геометрических параметров объектов в виртуальных средах. В качестве средств ввода команд управления от человека-оператора в обеих группах использовалось аналогичное (одно и то же) оборудование – джойстики с рукоятками, аналогичными применяемым в лесозаготовительной технике производства Ponsse.

Также использовался идентичный компьютер и программное обеспечение. Отличие тестов состояло только в способе представления зрительной информации человеку-оператору, что необходимо для исключения ошибок измерений, связанных с быстроедействием различного оборудования операторского интерфейса, которые могли бы влиять на надёжность результатов тестирования. Использование одного и того же оборудования (джойстиков, компьютера, программного обеспечения) исключает дополнительные погрешности в какой-либо группе тестирования. Такой подход является общепринятым и рекомендуемым для использования при проведении тестирования скорости операторских реакций с использованием компьютерного оборудования [22].

После сбора данных были исключены из анализа участники, имеющие хотя бы один выброс в том или ином тестировании, так как методы анализа очень чувствительны к наличию выбросов в данных. Итого каждая группа тестирования в конечном итоге имела по 49 человек.

В качестве теста использовался разработанный авторами тест, измеряющий точность восприятия размеров и форм геометрических объектов оператором.

Суть разработанного теста заключалась в том, что оператору визуально предъявлялись различные геометрические объекты, имеющие неправильную форму. Оператор, управляя движением прицела в виде зелёного креста перемещением рукоятки джойстика, прицеливался как можно точнее в центр тяжести геометрического объекта и нажимал кнопку готовности, расположенную на джойстике. Центр тяжести на объекте не был никак отмечен. Схематическое изображение теста представлено на рис. 2.

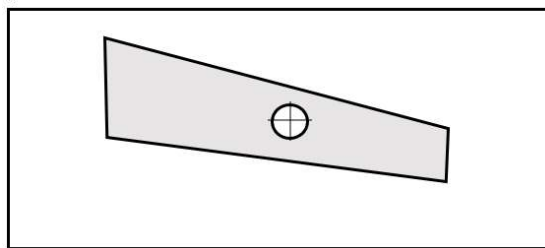


Рис. 2. Схема выполнения теста
Fig. 2. Test execution scheme

При нажатии оператором кнопки готовности запускалось следующее повторение теста, при котором изменялось положение целевого объекта, его размеры и форма. Примеры целевых объектов и изображения с экрана при выполнении некоторых повторений теста оператором представлены на рис. 3.

Таким образом, задача оператора состояла в том, чтобы оценить геометрические размеры и форму предъявленного объекта, визуально определить положение центра тяжести этого объекта, навести

прицел с помощью джойстика как можно точнее в центр тяжести объекта и нажать кнопку готовности.

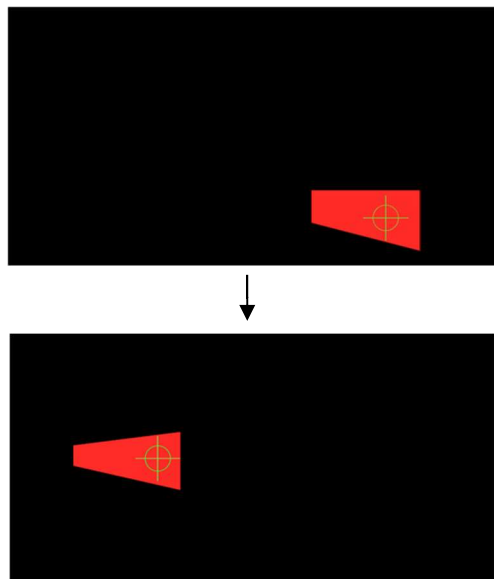


Рис. 3. Изображения с экрана при выполнении повторений теста оператором

Fig. 3. Screen images during test repetitions performed by the operator

Всего оператору предлагалось выполнить 13 повторений теста – три первых повторения для привыкания к тесту и десять последующих повторений для контрольных измерений точности восприятия геометрических размеров и форм объектов оператором.

Тестирование проводилось в один и тот же день недели (понедельник) в одно и то же время, днём в период с 13:00 до 16:00. Учитывая достаточно большой объём тестирования (величины выборки), провести тестирование со всеми добровольцами в один день и примерно в одно и то же время не представлялось возможным. Проведение тестирования в один день со всеми добровольцами требовало значительно большего временного интервала (с раннего утра до позднего вечера), что было невозможно с точки зрения обеспечения надёжности результатов и исключения фактора утомляемости. При этом, логично предположить,

что операторы, выполняющие тест в вечерние часы, имели бы значительно более высокий уровень утомления по сравнению с теми, кто выполнял тестирование в утренние или дневные часы. Таким образом, тестирование выполнялось четыре недели подряд, в один день недели примерно в одно и то же время для всех операторов.

Перед проведением тестирования все операторы были ознакомлены с порядком проведения тестирования, с принципами функционирования технического обеспечения, джойстиков, а также шлема виртуальной реальности.

Для оценки статистически значимой разницы между группами был применён подход bootstrapping [23] с размером выборки в 20 человек. Был использован уровень значимости 5 % для определения того, что распределения в группах по некоторым показателям различны.

Для выявления возможных кластеров в результатах измерений были использованы методы кластерного анализа. Для выявления возможных кластеров были использованы методы понижения размерности t-SNE [24], а также метод машинного обучения без учителя k-means [25]. Для поиска оптимального количества кластеров k-means был использован «метод локтя» [26], в качестве метрики «расстояние» было использовано евклидово представление [27]. «Методом локтя» оценивалась сумма квадратов расстояний каждой точки данных до их центроиды (WCSS). Все расчёты по анализу данных были выполнены с использованием языка программирования python3 и библиотек numpy [28], pandas [29], scipy [30], scikit-learn [31]. Перед использованием алгоритмов данные были стандартизированы. Понижение размерности проходило до двух переменных.

Результаты исследования

В качестве метрик в результатах прохождения тестирования для обеих групп тестирования (группа с VR и группа

с восприятием с электронного дисплея) были использованы:

- 1) среднее отклонение по горизонтальной оси, выраженное в условных единицах расстояния;
- 2) среднее отклонение по вертикальной оси, выраженное в условных единицах расстояния;
- 3) суммарная ошибка позиционирования, выраженная в расстоянии L^1 ;
- 4) среднее время прохождения теста, выраженное в миллисекундах.

Согласно результатам (табл. 2) bootstrap р-значение везде превышает уровень значимости. Таким образом, различий в прохождении тестов для группы VR и группы с восприятием информации с электронного дисплея не отмечено.

В ходе анализа групп VR и с восприятием информации с электронных дисплеев установлено, что алгоритм k-means с «методом локтя» и t-SNE производят оптимальное разбиение группы с восприятием информации с электронных дисплеев на два кластера (рис. 3). Координаты центров кластеров представлены в табл. 3.

Таблица 2. **Bootstrap-анализ прохождения тестов для группы VR и группы с восприятием информации с электронного дисплея**

Table 2. Bootstrap-analysis of test performance for the VR group and the group perceiving information from an electronic display

Метрика	P-value (bootstrap)
Среднее отклонение по горизонтальной оси	0,64
Среднее отклонение по вертикальной оси	0,51
Суммарная ошибка позиционирования	0,53
Среднее время прохождения теста	0,49

Разбиение на два кластера для группы с восприятием информации с электронных дисплеев происходит по успешности прохождения теста (табл. 3). При этом сбор всех участников из группы III в одном кластере с худшим прохождением теста вероятнее всего является случайностью, а не закономерностью. Во-первых, проф. группа III малочисленная, во-вторых, расположение испытуемых в представлении t-SNE имеет граничный характер между кластерами, в-третьих проф. группа III не имеет тенденции к агломерации в группе с восприятием информации в виртуальной среде.

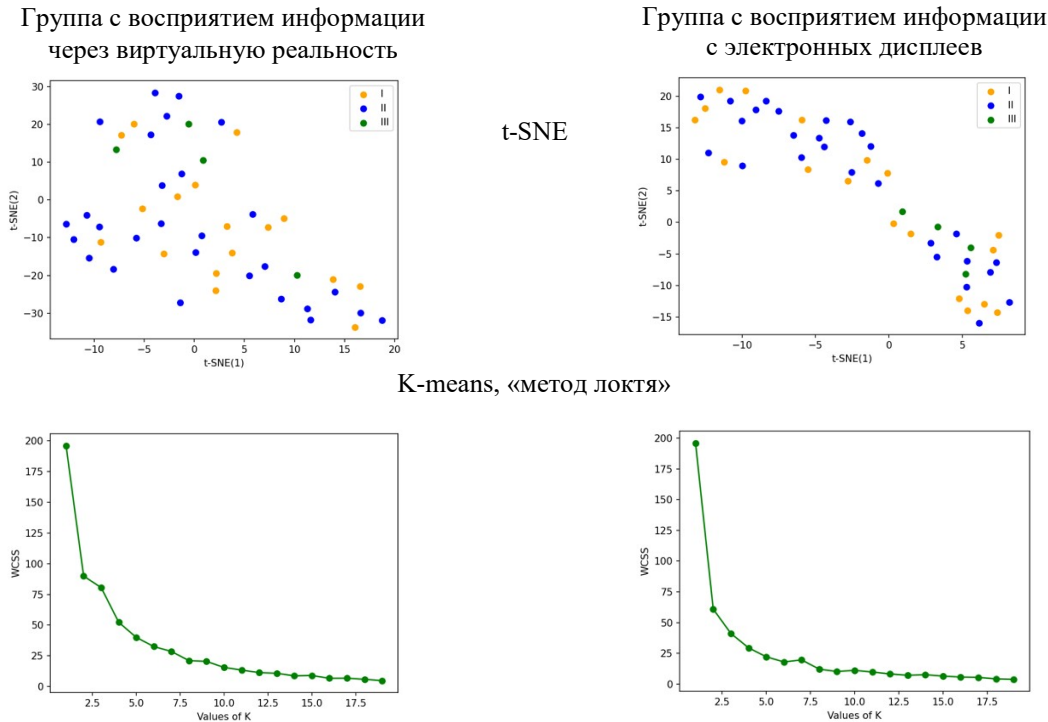


Рис. 3. Результаты кластеризации данных t-SNE и k-means
Fig. 3. Results of t-SNE and K-means data clustering

Таблица 3. Координаты центров кластеров после кластеризации t-SNE группы с восприятием информации с электронных дисплеев

Table 3. Coordinates of cluster centers after t-SNE clustering of the group that perceived information from electronic displays

Номер кластера	Координаты центра кластера			
	среднее отклонение по горизонтальной оси, усл. ед.	среднее отклонение по вертикальной оси, усл. ед.	среднее отклонение, усл. ед.	среднее время прохождения теста, мс
1	0,12	0,09	0,21	1 662,20
2	0,03	0,02	0,05	4 678,65

Обсуждение результатов

В данной работе сравнивалась точность восприятия размеров и форм геометрических объектов операторов в условиях восприятия информации в виртуальных средах и при восприятии информации с электронных дисплеев.

Основной гипотезой, выдвинутой авторами, была гипотеза о том, что точность восприятия размеров и форм геометрических объектов в виртуальных средах будет отличаться от точности восприятия параметров этих же геометрических объектов при восприятии их с электронных дисплеев. Теоретически это было бы объяснимо различными механизмами бинокулярного зрения в виртуальной среде и при восприятии фактически плоских, двумерных объектов на электронном дисплее.

Однако статистически значимых различий в результатах измерения как точности восприятия размеров и форм геометрических объектов, так и скорости этого процесса при различных способах отображения видеoinформации оператору обнаружить не удалось – P-value в обработке результатов Bootstrap как по различным метрикам ошибок позиционирования объектов и джойстиков, так и по времени выполнения задачи везде превышает уровень значимости 5 %. Это означает глубокую корреляцию результатов измерений как времени выполнения задачи, так и ошибок позиционирования, полученных в обеих группах.

Это может означать, что погружение в виртуальные среды не оказывает существенного как негативного, так и позитив-

ного эффекта на точность восприятия геометрических размеров и форм объектов оператором. Однако, следует заметить, что в данном тесте все объекты операторам как в группе с восприятием информации как в виртуальной среде, так и в группе с восприятием информации с электронного дисплея предъявлялись на одинаковом (близком) расстоянии в трёхмерной плоскости поля зрения оператора.

Вариаций по «отдалению» объектов от оператора тестирование не предусматривало, поскольку исследование проводилось в контексте, в первую очередь, операторов лесозаготовительной техники. Операторы лесозаготовительной техники в процессе захвата объектов находятся всегда на относительно близком и постоянном расстоянии до целей. Полагаясь на опыт предыдущих исследований по восприятию расстояний в виртуальных средах, где установлено, что более «далёкие» расстояния в виртуальных средах воспринимаются значительно хуже по сравнению с физическими средами, возможно, существует различие в восприятии геометрических размеров и форм объектов, расположенных на более дальних расстояниях в поле зрения оператора.

Также следует отметить, что в этом исследовании в качестве некоторой обобщающей метрики точности восприятия геометрических размеров и форм объектов оператору предлагалось найти центр тяжести объекта визуально. Такой подход обусловлен также спецификой деятельности оператора лесозаготовительной машины, поскольку задача определения центра

тяжести объектов в ходе выполнения технологической операции погрузки является типичной. Но этот процесс для не опытных операторов может быть затруднительным, поскольку является когнитивно сложным процессом, развитым в основном у опытных операторов и спортсменов.

Авторы допускают, что затруднения с определением центра тяжести объектов также могли повлиять на результаты тестирования. Этим объясняется и обнаруженная кластеризация на два явных кластера в группе с восприятием информации с электронных дисплеев. В результате кластеризации видно, что операторы, входящие в один кластер, выполняли задачу менее точно, но с большей скоростью, а операторы, входящие в другой кластер, наоборот, выполняли задачу с большей точностью, но им требовалось больше времени. Также некоторые операторы отмечали, что им трудно определять центры тяжести визуально и они никогда ранее не сталкивались с такой задачей.

Вероятнее всего, операторы, входящие в кластер с меньшей точностью и более быстро выполняющие тест, в качестве центра тяжести объектов использовали просто центр этих объектов, то есть пересечение диагоналей. Это проще с точки зрения когнитивной нагрузки, такая задача является более понятной оператору, но находить центр тяжести таким образом в реальных задачах погрузки сортиментов (брёвен) является некорректным.

При этом сбор всех участников из группы профессионального отбора III в одном кластере с худшим прохождением теста, вероятнее всего, является случайностью, а не закономерностью. Это объяснимо малочисленностью этой группы, но требует дополнительных исследований.

Новым и особенно интересным результатом является то, что погружение в виртуальную среду и изоляция оператора от окружающей среды (то есть фактически лишение его возможности визуально наблюдать физические джойстики) также

не оказывает ни негативного, ни позитивного влияния на точность позиционирования прицела с помощью джойстиков и на скорость этого позиционирования.

Выводы

В данной работе сравнивалась точность восприятия размеров и форм геометрических объектов операторов в условиях восприятия информации в виртуальных средах и при восприятии информации с электронных дисплеев.

Статистически значимых различий в результатах измерения как точности восприятия размеров и форм геометрических объектов, так и скорости этого процесса при различных способах отображения видеoinформации оператору обнаружить не удалось – P-value в обработке результатов Bootstrap как по различным метрикам ошибок позиционирования объектов и джойстиков, так и по времени выполнения задачи везде превышает уровень значимости 5 %.

Погружение в виртуальные среды не оказывает существенного как негативного, так и позитивного эффекта на точность восприятия геометрических размеров и форм объектов оператором. Это даёт основания полагать, что виртуальные среды вполне можно использовать для обучения операторов подвижных объектов и манипуляторов, а именно для отработки задач наведения рабочих органов на цели и объекты.

Учитывая прочие преимущества виртуальных сред, такие как эффект глубокого погружения и реалистичность симуляции технологических процессов, и результаты, полученные в этом исследовании, можно предполагать, что обучение операторов манипуляторов задачам наведения в виртуальных средах будет иметь преимущества по сравнению с обучением их в симуляторах на основе электронных дисплеев.

Также не обнаружено связи между опытом работы оператора в виртуальных средах или каких-либо иных факторов

и точностью восприятия им информации. Эти данные позволяют применять виртуальные обучающие среды в процессе

обучения операторов без предварительных мер по адаптации операторов к виртуальным средам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Петухов И. В. К вопросу обеспечения надёжности эргатических систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 25–30. EDN: NCKUJP
Petukhov I. V. To the Question of Maintenance of Reliability Human-Machine System. *Mechatronics, Automation, Control*. 2011;(1):25–30. EDN: NCKUJP (In Russ.).
2. Nardo M., Forino D., Murino T. The evolution of man-machine interaction: the role of human in Industry 4.0 paradigm. *Production & manufacturing research*. 2020;8(1):20–34. DOI: 10.1080/21693277.2020.1737592
3. Petukhov I., Steshina L. Assessment of vocational aptitude of man-machine systems operators. In: *Proceedings 7th International Conference on Human System Interactions, HIS-2014* (Costa da Caparica, Portugal, June 16-18, 2014). IEEE Publ., 2014:44–48. DOI: 10.1109/HSI.2014.6860446
4. Read G. J. M., Shorrock S., Walker G. H. et al. State of science: evolving perspectives on ‘human error’. *Ergonomics*. 2021;64(9):1091–1114. DOI: 10.1080/00140139.2021.1953615
5. Palander T., Ovaskainen H., Tikkanen L. An adaptive work study method for identifying the human factors that influence the performance of a human-machine system. *Forest Science*. 2012;58(4):377–389. DOI: 10.5849/forsci.11-013
6. Иванов В. В. Факторы, влияющие на работу харвестера // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XIV Международного евразийского симпозиума, Екатеринбург, 17–20 сентября 2019 года. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2019. С. 53–58. EDN: TWFVWX
Ivanov V. V. Factors, that Can Affect the Operation of the Harvester. In: *Woodworking: technologies, equipment, management of the 21st century: Proceedings of the XIV International Eurasian Symposium* (Ekaterinburg, September 17–20, 2019). Ekaterinburg, Ural State Forest Engineering University; 2019:53–58. EDN: TWFVWX (In Russ.).
7. Tervo K., Palmroth L., Koivo H. Skill evaluation of human operators in partly automated mobile working machines. *IEEE Transactions on automation science and engineering*. 2010;7(1):133–142. DOI: 10.1109/TASE.2009.2025364
8. Petukhov I., Steshina L., Glazyrin A. Application of virtual environments in training of ergatic system operators. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018;16(3):398–403. DOI: 10.5937/JAES16-17382
9. Lapointe J. F., Robert J. M. Using VR for Efficient Training of Forestry Machine Operators. *Education and Information Technologies*. 2000;5(4): 237–250. DOI: 10.1023/A:1012045305968
10. Zheng Y., Cheng B., Huang Q. et al. Research on Virtual Driving System of a Forestry Logging Harvester. *Wireless Personal Communications*. 2018;102(2):667–682. DOI: 10.1007/s11277-017-5085-3
11. Pereira Jr J. Development of a Harvester Machine Simulator in Virtual Reality. Master of Science Thesis. Tampere University, Finland, 2019. 70 p. Available from: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201906192113> [Accessed 10 October 2024]
12. Hartsch F., Schönauer M., Breinig L., et al. Influence of Loading Distance, Loading Angle and Log Orientation on Time Consumption of Forwarder Loading Cycles: A Pilot Case Study. *Forests*. 2022;13(3):384. DOI: 10.3390/f13030384
13. Steshina L., Petukhov I., Tanryerdiev I. et al. Training of high-skilled workers using exercisers and simulators. In: *3rd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science, EECS* (Athens, Greece, Dec.28-30, 2019). IEEE Publ., 2019:134–139. DOI: 10.1109/EECS49779.2019.00036
14. Bachman P., Milecki A. Safety Improvement of Industrial Drives Manual Control by Application of Haptic Joystick. In: *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance (ISPEM 2018)*. Burduk A., Chlebus E., Nowakowski T., Tubis A. (eds). Springer International Publishing, 2019:563–573. DOI: 10.1007/978-3-319-97490-3_54
15. Hornsey R. L., Hibbard P. B., Scarfe P. Size and shape constancy in consumer virtual reality. *Behavior research methods*. 2020;52(1):1587–1598. DOI: 10.3758/s13428-019-01336-9
16. Creem-Regehr S. H., Stefanucci J. K., Bodenheimer B. Perceiving distance in virtual reality: theoretical insights from contemporary technologies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2023;378(1869):20210456. DOI: 10.1098/rstb.2021.0456
17. Ping J, Weng D, Liu Y et al. Depth perception in shuffleboard: Depth cues effect on depth perception in virtual and augmented reality system. *Journal of the Society for Information Display*. 2020;28(2): 164–176. DOI: 10.1002/jsid.840
18. Lebreton P., Raake A., Barkowsky M. et al. Measuring perceived depth in natural images and study of its relation with monocular and binocular depth cues. In: *Stereoscopic Displays and Applications XXV*. SPIE Electronic Imaging 2014 (February 2–6, 2014, San Francisco, California, United States).

- Woods A. J., Holliman N. S., Favalora G. E. (eds). SPIE, 2014;9011:82–92. DOI: 10.1117/12.2040055
19. Watt S. J., Akeley K., Ernst M. O. et al. Focus cues affect perceived depth. *Journal of vision*. 2005;5(10):834–862. DOI: 10.1167/5.10.7
20. Kim J. J., McManus M. E., Harris L. R. Body orientation affects the perceived size of objects. *Perception*. 2022;51(1):25–36. DOI: 10.1177/03010066211065673
21. Harris L. R., Mander C. Perceived distance depends on the orientation of both the body and the visual environment. *Journal of vision*. 2014;14(12):17. DOI: 10.1167/14.12.17
22. Holden J., Francisco E., Lensch R. et al. Accuracy of different modalities of reaction time testing: Implications for online cognitive assessment tools. *BioRxiv*. 2019:726364. DOI: 10.1101/726364
23. Efron B. Second thoughts on the bootstrap. *Statistical science*. 2003;18(2):135–140. DOI: 10.1214/ss/1063994968
24. Van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of machine learning research*. 2008;9:2579–2605.
25. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (June 21–July 18, 1965 and December 27, 1965–January 7, 1966, University of California, Berkeley). Le Cam L. M., Neyman J. (eds). University of California Press, 1967;5.1:281–297.
26. Thorndike R. L. Who belongs in the family? *Psychometrika*. 1953;18(4):267–276. DOI: 10.1007/BF02289263
27. Deza M. M., Deza E. Encyclopedia of distances. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg; 2009. 590 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00234-2
28. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020;585:357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2
29. McKinney W. Data structures for statistical computing in Python. In: *The 9th annual Scientific Computing with Python conference, SciPy 2010* (June 28–July 3, 2010, Austin, Texas). SciPy, 2010;56–61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a
30. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*. 2020;17(3):261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2
31. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of machine learning research*. 2011;12:2825–2830.

Статья поступила в редакцию 22.10.2024; одобрена после рецензирования 15.11.2024; принята к публикации 25.11.2024

Информация об авторах

СТЕШИН Илья Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – интеллектуальный анализ данных, нейронные сети. Автор шести научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4241-3798>; SPIN-код: 2965-9368

ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – интеллектуальный анализ, человеко-машинные системы, автоматическое управление. Автор 224 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; SPIN-код: 6009-1846

СТЕШИНА Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и производства ЭВС, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – интеллектуальный анализ, человеко-машинные системы, автоматическое управление. Автор 136 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>; SPIN-код: 3493-0013

ТАНРЫВЕРДИЕВ Илья Оруджевич – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и производства ЭВС, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – автоматизация процессов лесозаготовки, автоматическое управление. Автор 64 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2437-6339>; SPIN-код: 4111-0072

Вклад авторов:

Стешин И. С. – выбор методов анализа, проведение кластерного анализа, обработка результатов измерений, визуализация данных, подготовка статьи.

Петухов И. В. – концепция, постановка цели и задач, подготовка и редактирование статьи.

Стешина Л. А. – разработка гипотезы, методики эксперимента.

Танрывердиев И. О. – проведение эксперимента.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630.935.1

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.61>

EDN: WSORUK

Evaluating the Accuracy of Solving the Simplest Sensory-Cognitive Tasks by the Operator of Ergatic Systems

I. S. Steshin, I. V. Petukhov[✉], L. A. Steshina, I. O. Tanryverdiev

Volga State University of Technology,

3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

PetuhovIV@volgatech.net[✉]

Abstract. *Introduction.* The use of training complexes and simulators is now considered to be an effective means of preparing operators of complex technological systems. At the same time, there is a considerable divergence in the composition of the technical equipment applied in the training complexes, which raises the question of dependence between training results and technologies used. *The study is aimed* at evaluating the accuracy of solving the simplest sensory-cognitive tasks significant for effective professional activity in conditions of information perception in virtual environments and from electronic displays. The hypothesis was tested about the dependence of the results of solving sensory-cognitive tasks on the modality of information presentation. *The object of the study* is elementary sensory-cognitive tasks based on the assessment of the center of mass of geometric objects. These tasks were chosen as typical ones faced by operators involved in the loading and unloading process. Such a task encompasses a sensory component in terms of geometric shape assessment and a cognitive one. *The methods* for solving the problem are those of cluster analysis including the t-SNE dimensionality reduction technique and the K-means unsupervised machine learning algorithm that allow the identification of patterns in the experiment results. *Results.* The analysis revealed no statistically significant differences in the results of measuring either the accuracy of the perception of geometric object sizes and shapes or the speed of this process when using different modalities of presenting video information to the operator. This indicates that the way the information is presented does not affect the results. *Conclusion.* It has been established that immersion in virtual environments does not have a significant negative or positive effect on the accuracy of the operator's perception of the sizes and shapes of geometric objects. Given the other advantages of virtual environments, it can be assumed that training manipulator operators in guidance tasks in virtual environments will have minor advantages compared to their training them in simulators based on electronic displays, primarily perhaps due to the element of novelty.

Keywords: human-machine interaction; professional training; computer training devices; virtual environment; simulator

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-19-00568 “Methods and intelligent system for supporting dynamic stability of operators of ergatic systems”, <https://rscf.ru/project/23-19-00568/>.

For citation: Steshin I. S., Petukhov I. V., Steshina L. A. et al. Evaluating the Accuracy of Solving the Simplest Sensory-Cognitive Tasks by the Operator of Ergatic Systems. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(4):61–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.4.61>; EDN: WSORUK

The article was submitted 22.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024;
accepted for publication 25.11.2024

Information about the authors

Ilya S. Steshin – postgraduate student, Junior Researcher, Volga State University of Technology. Research interests – data mining, neural networks. Author of six scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4241-3798>; SPIN: 2965-9368

Igor V. Petukhov – Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Chair of Design and Production of Computing Systems, Volga State University of Technology. Research interests – data mining, human-machine systems, automatic control. Author of 224 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; SPIN: 6009-1846

Ludmila A. Steshina – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Chair of Design and Production of Computing Systems, Volga State University of Technology. Research interests – data mining, human-machine systems, automatic control. Author of 136 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1526-991X>; SPIN: 3493-0013

Ilya O. Tanryverdiev – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Chair of Design and Production of Computing Systems, Volga State University of Technology. Research interests – automation of logging processes, automatic control. Author of 64 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2437-6339>; SPIN: 4111-0072

Contribution of the authors:

Steshin I. S. – selection of analysis methods, cluster analysis, processing of measurement results, data visualization, article preparation.

Petukhov I. V. – concept, setting goals and objectives, article preparation and editing.

Steshina L. A. – development of hypothesis, experimental methods.

Tanryverdiev I. O. – conducting the experiment.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.