

УДК 004.93

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.006)

Статистическая оценка различий зрительных стратегий и внутрисессионной динамики обучения операторов при промышленной сборке на основе мобильного айтрекинга и компьютерного зрения

К.А. Гурбанов✉

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Резюме. Выполнен статистический анализ поведенческих показателей оператора, выполняющего реальную промышленную сборочную операцию. Показатели рассчитываются автоматически по данным мобильного айтрекера и алгоритмов компьютерного зрения – детекции рук и целевых объектов. На предшествующих этапах исследования были разработаны мультимодальная система регистрации и описательные групповые показатели по той же задаче; значимость наблюдавшихся различий при этом не проверялась. В данной работе единицей анализа служит отдельная попытка: обработаны 22 записи сборки, выполненной экспертом и двумя начинающими операторами в организованном и неорганизованном условиях рабочего места. Применен критерий Манна-Уитни с оценкой величины эффекта по дельте Клиффа, введен показатель частоты переключений между зонами интереса, рассмотрена динамика показателей при повторных выполнениях операции. Установлено, что эксперт и начинающие операторы значительно различаются по длительности выполнения, энтропии переходов между зонами интереса, частоте переключений внимания и доле фиксации вне целевых объектов; по большинству показателей величина эффекта большая. В организованном условии взгляд чаще и разнообразнее переключается между целевыми зонами, в неорганизованном дольше задерживается на фоновых областях поиска. У начинающего оператора длительность выполнения значительно сокращается от повторения к повторению, у эксперта тренд отсутствует. Показатели чувствительны к уровню подготовки и к ходу освоения операции и могут применяться для объективного контроля обучения операторов и оценки организации рабочей зоны.

Ключевые слова: айтрекинг, компьютерное зрение, промышленная сборка, зрительные стратегии, энтропия переходов, обучение оператора, непараметрическая статистика, эргономика.

Для цитирования: Гурбанов К.А. Статистическая оценка различий зрительных стратегий и внутрисессионной динамики обучения операторов при промышленной сборке на основе мобильного айтрекинга и компьютерного зрения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2571> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.006

Statistical assessment of differences in visual strategies and within-session learning dynamics of operators during industrial assembly based on mobile eye tracking and computer vision

K.A. Gurbanov✉

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Abstract. A statistical analysis of operator behavior indicators has been performed for an operator executing a real industrial assembly task. The indicators are computed automatically from mobile eye-tracker data and computer vision algorithms – hand and target object detection. At earlier stages of this research the multimodal recording system was developed and descriptive group-level values for the same task were reported; the significance of the observed differences was not tested. Here the unit of

analysis is an individual trial: 22 recordings of the assembly performed by one expert and two novice operators under organized and disorganized workplace conditions were processed. The Mann–Whitney test with the Cliff's delta effect size was applied, an indicator (the rate of switching between areas of interest) was introduced, and the dynamics of the indicators over repeated executions was examined. The expert and the novices differ significantly in task duration, gaze transition entropy, attention switching rate and the fraction of fixations outside target objects, with large effect sizes for most indicators. Under the organized condition gaze switches between target zones more often and more diversely, whereas under the disorganized condition it dwells longer on background search areas. For the novice operator the task duration decreases significantly from repetition to repetition, while the expert shows no such trend. The indicators are sensitive both to skill level and to the course of task learning and can be used for objective monitoring of operator training and for assessing workplace layout.

Keywords: eye tracking, computer vision, industrial assembly, visual strategies, gaze transition entropy, operator training, nonparametric statistics, ergonomics.

For citation: Gurbanov K.A. Statistical assessment of differences in visual strategies and within-session learning dynamics of operators during industrial assembly based on mobile eye tracking and computer vision. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/journal/article?id=2571> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.006

Введение

Современные производственные системы все чаще рассматриваются не только как совокупность машин и цифровых модулей, но и как человеко-центрированные среды, где оператор остается важным участником производственного процесса. Даже при высокой степени автоматизации человек выполняет операции, требующие визуального поиска, выбора деталей, проверки текущего этапа и точного ручного взаимодействия с инструментами. Поэтому в промышленной сборке важно не только конечное время выполнения задачи, но и структура поведения оператора: куда он смотрит, какие объекты ищет, в какой момент начинает ручное действие. Связь взгляда и ручного действия в естественных задачах хорошо документирована: при умелом выполнении взгляд, как правило, опережает руку и направляется на объект манипуляции [1, 2].

На практике поведение оператора обычно оценивают по внешним результатам: времени выполнения, числу ошибок, наблюдениям инструктора. Такие показатели полезны, но не объясняют, почему выполнение стало менее эффективным: за ростом времени операции может стоять недостаток опыта, плохая организация рабочего места, трудность поиска инструмента или неуверенность в последовательности действий. Для диагностики нужны промежуточные поведенческие признаки, отражающие распределение зрительного внимания во времени. Физиологические методы (электроэнцефалография, функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия, датчики сердечного ритма) дают доступ к внутреннему состоянию человека, но в реальном производстве приживаются плохо: требуют настройки, чувствительны к движению, мешают ручной работе [3, 4]. Видеоориентированный мониторинг действий сборщика активно развивается [5], однако когнитивные и учебные аспекты поведения в таких системах, как правило, не рассматриваются. Отсюда интерес к неинвазивным подходам на основе мобильного айтрекинга и компьютерного зрения.

Данная работа продолжает цикл исследований по видеоориентированному анализу поведения оператора. На первом этапе в пилотном эксперименте с одним экспертом была показана возможность оценки визуально-перцептивной нагрузки по данным мобильного айтрекинга и детекции объектов. На втором этапе разработана мультимодальная система регистрации, объединяющая координаты взгляда, детекцию рук и детекцию объектов в единую покадровую структуру, и собран массив из 22 записей сборочной операции, для которого рассчитаны описательные групповые показатели. Оба этапа носили системный и описательный характер: значимость наблюдаемых различий

не проверялась, а повторные выполнения операции использовались только для усреднения. Между тем зависимость зрительного поведения от уровня подготовки устойчиво воспроизводится в литературе: метаанализ исследований зрительной экспертизы показывает, что специалисты используют более короткие фиксации, чаще обращаются к информативным областям и совершают более длинные саккады, чем новички [6], а прямое сопоставление экспертов и новичков с одновременной регистрацией движений глаз и электроэнцефалограммы выявляет различия и в распределении внимания, и в уровне нагрузки [7]. Проверка того, воспроизводятся ли такие различия в реальной сборочной операции при полностью автоматическом расчете показателей, и составляет предмет данной работы.

Данная работа отвечает на три вопроса: 1) значимы ли различия зрительных стратегий эксперта и начинающих операторов на уровне отдельных попыток; 2) как организация рабочего места меняет структуру переключений зрительного внимания; 3) виден ли процесс освоения операции в изменении показателей от повторения к повторению внутри одной сессии. Для этого применяются непараметрические критерии с оценкой величины эффекта, вводится показатель частоты переключений между зонами интереса и строятся кривые обучения. Ранее выходом методики являлись групповые средние; здесь единицей анализа выступает отдельная попытка: для каждой из 22 записей рассчитываются длительность выполнения, доля фиксаций вне целевых объектов, энтропия переходов между зонами интереса и частота переключений внимания, после чего проверяются гипотезы о различиях между группами, между условиями рабочего места и о наличии монотонного тренда показателей по номеру повторения.

Материалы и методы

Рассматривается промышленная сборочная операция, выполняемая оператором в рабочей зоне с набором инструментов и деталей. Видеозапись ведется от первого лица с помощью мобильного айтрекера, что дает изображение сцены и координаты точки взгляда во временной привязке к кадрам. Дополнительно применяются алгоритмы компьютерного зрения: детекция рук и детекция промышленных объектов. Все данные приводятся к единой временной структуре, по которой для каждой записи рассчитывается набор показателей зрительной стратегии. Общая схема обработки приведена на Рисунке 1.

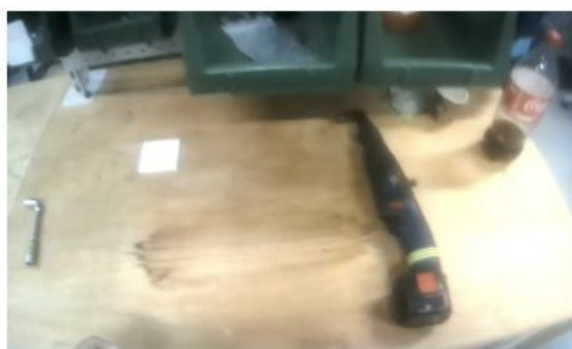


Рисунок 1 – Общая схема автоматизированной обработки данных: от записи операции к покадровой синхронизации и расчету поведенческих показателей

Figure 1 – General scheme of automated data processing: from operation recording to frame-level synchronization and computation of behavioral indicators

Экспериментальная операция и условия рабочего места. Анализ выполнялся на реальной задаче ручной сборки промышленной тележки в промышленно-учебной среде. Всего обработано 22 записи: 10 записей одного эксперта и 12 записей двух начинающих операторов. Каждый участник повторял одну и ту же последовательность сборочных действий до пяти раз в каждом из двух условий рабочего места, поэтому наряду с групповыми различиями можно анализировать и динамику по повторениям.

В организованном условии инструменты и детали находились в стабильных, видимых и предсказуемых местах в зоне удобной досягаемости; организация рабочего места соответствовала принципам LEAN/Kaizen. В неорганизованном условии объекты не имели фиксированных позиций, часть инструментов была менее заметна, а посторонние предметы создавали визуальный шум (Рисунок 2). Процедура сборки оставалась одинаковой во всех записях, поэтому различия в показателях отражают эффект структуры рабочей зоны и уровня подготовки, а не изменение самой задачи.



а)



б)

Рисунок 2 – Расположение инструментов и деталей в рабочей зоне: а – неорганизованное; б – организованное

Figure 2 – Arrangement of tools and parts in the work area: a – disorganized; b – organized

Оборудование и программная обработка. Зрительное поведение регистрировалось мобильным айтрекером Pupil Labs Neon¹: видео сцены от первого лица с частотой 30 Гц, данные взгляда – по бинокулярным инфракрасным глазным камерам с частотой 200 Гц. Обработка выполнялась офлайн. Руки определялись с помощью MediaPipe; инструменты и детали распознавались моделью YOLOv8n², обученной на более чем 850 размеченных изображениях промышленной сцены по 11 классам объектов. Для каждого кадра сохранялись координата взгляда, идентификатор фиксации, ограничивающие рамки рук, обнаруженные объекты и уверенность детекции (Таблица 1).

Таблица 1 – Основные компоненты системы регистрации и обработки данных

Table 1 – Main components of the recording and data processing system

Компонент	Роль в методике	Реализация в эксперименте
Pupil Labs Neon	Запись видео сцены, координат взгляда и фиксаций	Видео сцены: 30 Гц; глазные камеры: 200 Гц; данные взгляда сопоставлялись с ближайшими кадрами видеопотока
MediaPipe Hands	Покадровое выделение положения левой и правой руки	Для каждой видимой руки формировалась ограничивающая рамка

¹ Neon: Technical specifications. Pupil Labs. URL: <https://pupil-labs.com/products/neon/specs> (дата обращения: 08.07.2026).

² YOLOv8 Documentation. Ultralytics. URL: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo8> (дата обращения: 08.07.2026).

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

YOLOv8n	Локализация инструментов и деталей в рабочей зоне	Модель обучалась на более чем 850 изображениях промышленного окружения по 11 классам объектов; использовались рамки объектов и оценки уверенности детекции
Покадровая JSON-структура	Единая временная шкала для взгляда, рук и объектов	Каждая запись содержит идентификатор кадра, временную метку, координату взгляда, номер фиксации, рамки рук, классы и рамки объектов, оценки уверенности

Синхронизация данных и сопоставление взгляда с объектами. Основной временной шкалой служил видеопоток сцены. Для каждого кадра выбиралась ближайшая по времени координата взгляда, фиксировался идентификатор фиксации, добавлялись рамки рук и список обнаруженных объектов. Если точка взгляда попадала внутрь ограничивающей рамки объекта, фиксация относилась к соответствующей зоне интереса (AOI); в противном случае – к фоновой зоне (null). Сопоставление фиксаций с зонами интереса – стандартный прием анализа айтрекинговых данных [8]. Фоновая зона не считается ошибкой оператора: взгляд вне обнаруженных объектов может означать поиск по рабочему пространству, контроль руки или планирование следующего действия (Рисунок 3).

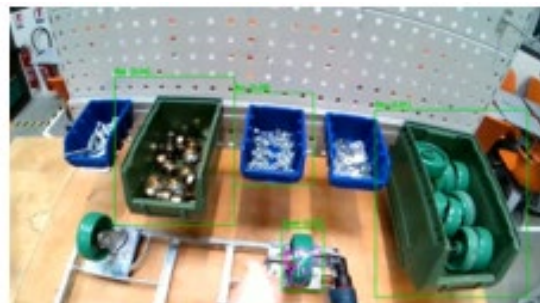


Рисунок 3 – Совмещенная визуализация детекции объектов, рук и точки фиксации взгляда
Figure 3 – Combined visualization of object detection, hand detection and gaze fixation point

Фиксации не выделялись собственным алгоритмом: использовалась разметка штатного детектора Pupil Cloud, импортируемая вместе с записью (идентификатор фиксации, моменты начала и конца, длительность, координаты центра фиксации в кадре сцены). Детектор рассчитан на наשלемную регистрацию с подвижной сценой: скорость взгляда оценивается относительно оптического потока видео сцены, а порог скорости адаптируется к интенсивности движения головы, за счет чего компенсируются стабилизирующие движения глаз при вестибулоокулярном рефлексе [9]. Отдельная коррекция координат взгляда на движение головы не выполнялась и в данной схеме не требуется: айтрекер выдает координату взгляда в системе координат камеры сцены, жестко связанной с головой оператора, а зоны интереса не размечаются статически на кадре, а переопределяются детектором объектов в каждом кадре того же видеопотока. При повороте головы рамка объекта и точка взгляда смещаются согласованно, поэтому отнесение взгляда к зоне интереса не зависит ни от положения головы, ни от перемещения самого объекта по рабочей зоне.

Критерий отнесения был строгим: точка взгляда относилась к зоне интереса, если ее координаты лежали внутри ограничивающей рамки детекции, включая границы

($x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2$); расширение рамки, допуск в пикселях и угловой радиус вокруг точки взгляда не применялись. Учитывались детекции с уверенностью не ниже 0,25. При перекрытии рамок нескольких объектов взгляд относился к первой детекции кадра; на всем массиве точка взгляда попадала более чем в одну рамку лишь в 0,45 % кадров с валидными данными взгляда (3,3 % кадров с попаданием в рамку), поэтому правило разрешения перекрытий на результат практически не влияет. Если точка взгляда не попадала ни в одну рамку, кадр относился к фоновой зоне. Показатели рассчитывались по покадровой последовательности с частотой видеопотока сцены (30 Гц): время в зоне накапливалось шагом 1/30 с, переход засчитывался при смене зоны между соседними кадрами.

Показатели зрительной стратегии. Для каждой записи рассчитывались четыре показателя. Длительность выполнения – время от первого до последнего кадра записи. Доля фиксации вне целевых объектов – доля времени записи, в течение которого точка взгляда не попадала в рамку ни одного из целевых объектов сборки (болт, гайка, колесо, опора колеса); в нее входят как фоновая зона, так и нецелевые предметы рабочей зоны, чем и объясняются высокие абсолютные значения показателя. Энтропия переходов между зонами интереса – энтропия Шеннона по эмпирическому распределению переходов между АОИ всех обнаруженных классов объектов (с учётом фоновой зоны) в покадровой последовательности зон [10]: высокие значения соответствуют разнообразным, равномерно распределенным переключениям, низкие – концентрации переходов на немногих маршрутах. Частота переключений внимания – общее число переходов между АОИ, деленное на длительность записи (переходов в минуту). Частота переключений ранее не публиковалась; в отличие от энтропии она характеризует интенсивность переключений, а не их разнообразие, и не зависит от числа доступных зон. Для интерпретации дополнительно использовался профиль распределения времени фиксации по объектам (dwell-time).

Показатели, основанные на событиях ручного взаимодействия «рука – объект», включая индекс зрительно-ручной координации ЕНС, рассматривались на предыдущем этапе исследования и здесь не анализируются; причина изложена в разделе «Обсуждение».

Статистический анализ. Объем выборки мал, оснований предполагать нормальность распределений нет, поэтому использовались непараметрические методы. Различия между независимыми группами проверялись критерием Манна-Уитни [11], величина эффекта оценивалась дельтой Клиффа δ [12]; значения $|\delta| > 0,474$ трактовались как большой эффект. Монотонная динамика по номеру повторения оценивалась коэффициентом ранговой корреляции Спирмена (ρ). Уровень значимости $\alpha = 0,05$. Поправка на множественные сравнения не применялась: исследование носит разведочный характер, и значения p приводятся без коррекции, что следует учитывать при интерпретации. Единица анализа во всех сравнениях – отдельная запись, $n = 22$.

Результаты

В Таблице 2 приведены средние и стандартные отклонения показателей по попыткам, результаты критерия Манна-Уитни и величины эффекта. Все четыре показателя различают экспертное и начинающее выполнение на принятом уровне значимости.

Таблица 2 – Сравнение показателей эксперта и начинающих операторов по отдельным попыткам

Table 2 – Comparison of expert and novice indicators over individual trials

Показатель	Эксперт (M ± SD), n = 10	Начинающие (M ± SD), n = 12	U	p	δ Клиффа
Длительность выполнения, с	252,8 ± 12,5	296,4 ± 46,5	5	0,0003	−0,92
Доля фиксаций вне целевых объектов	0,896 ± 0,027	0,921 ± 0,052	29	0,044	−0,52
Энтропия переходов между АОI, бит	3,18 ± 0,24	2,50 ± 0,40	113	0,0005	0,88
Частота переключений АОI, 1/мин	96,5 ± 8,6	57,5 ± 22,8	110	0,0011	0,83

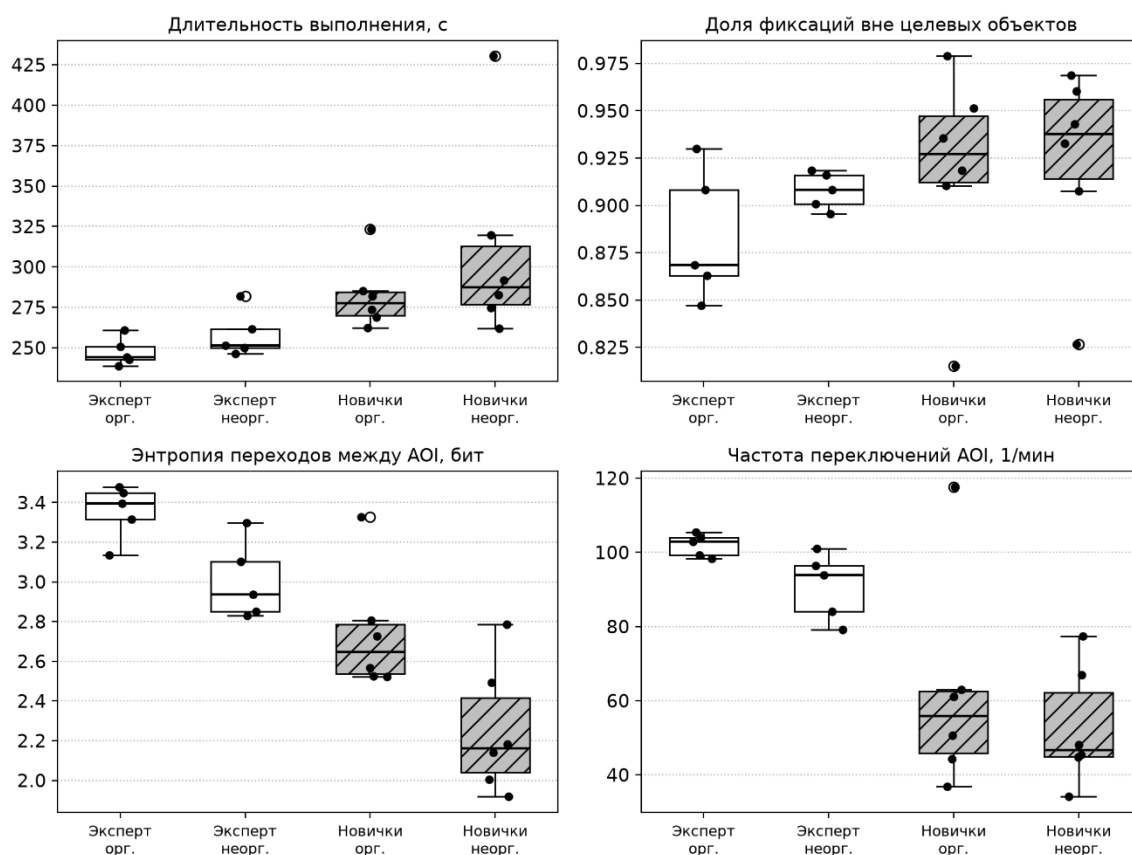


Рисунок 4 – Распределения показателей по попыткам в группах и условиях рабочего места (точки – отдельные записи)

Figure 4 – Distributions of indicators over trials by group and workspace condition (dots are individual recordings)

Начинающие операторы выполняли операцию дольше эксперта ($p < 0,001$; $\delta = -0,92$) и больше времени фиксировали взгляд вне целевых объектов ($p = 0,044$; $\delta = -0,52$). Самыми контрастными оказались показатели структуры переключений: энтропия переходов ($p < 0,001$; $\delta = 0,88$) и частота переключений ($p = 0,001$; $\delta = 0,83$) у эксперта выше (Рисунок 4). Взгляд эксперта часто и по разнообразным маршрутам переключается между целевыми объектами, коротко проверяя их состояние. У новичков внимание подолгу остается в фоновых областях – на поиске и контроле руки, а переключения между целевыми зонами происходят реже.

Организация рабочей зоны сказалась, прежде всего, на структуре переключений (Таблица 3). У эксперта энтропия переходов ($p = 0,016$; $\delta = 0,92$) и частота переключений ($p = 0,032$; $\delta = 0,84$) значимо выше в организованном условии; у начинающих операторов значимым оказался эффект энтропии ($p = 0,026$; $\delta = 0,78$). Длительность выполнения и доля фоновых фиксаций в неорганизованном условии ухудшались в обеих группах, но на имеющемся объеме выборки эти сдвиги значимости не достигли.

Таблица 3 – Влияние организации рабочего места внутри групп

Table 3 – Effect of workspace organization within groups

Группа	Показатель	Организованное (М)	Неорганизованное (М)	Р	δ Клиффа
Эксперт	Длительность, с	247,5	258,2	0,151	-0,60
Эксперт	Доля фиксаций вне объектов	0,883	0,908	0,310	-0,44
Эксперт	Энтропия переходов, бит	3,35	3,00	0,016	0,92
Эксперт	Частота переключений, 1/мин	102,0	90,9	0,032	0,84
Начинающие	Длительность, с	282,6	310,2	0,485	-0,28
Начинающие	Доля фиксаций вне объектов	0,918	0,923	0,937	-0,06
Начинающие	Энтропия переходов, бит	2,75	2,25	0,026	0,78
Начинающие	Частота переключений, 1/мин	62,2	52,8	0,818	0,11

Повторные выполнения одной операции позволяют проследить освоение задачи внутри сессии (Рисунок 5). У начинающего оператора длительность выполнения монотонно сокращалась от повторения к повторению в организованном условии ($p = -0,90$; $p = 0,037$; пять повторений). В неорганизованном условии направление эффекта то же ($p = -0,80$), но значимость не достигнута: попыток было четыре. У эксперта тренда нет ($p = 0,00$ в организованном условии) – его показатели стабильны от попытки к попытке, что согласуется с уже сформированной моторной программой.

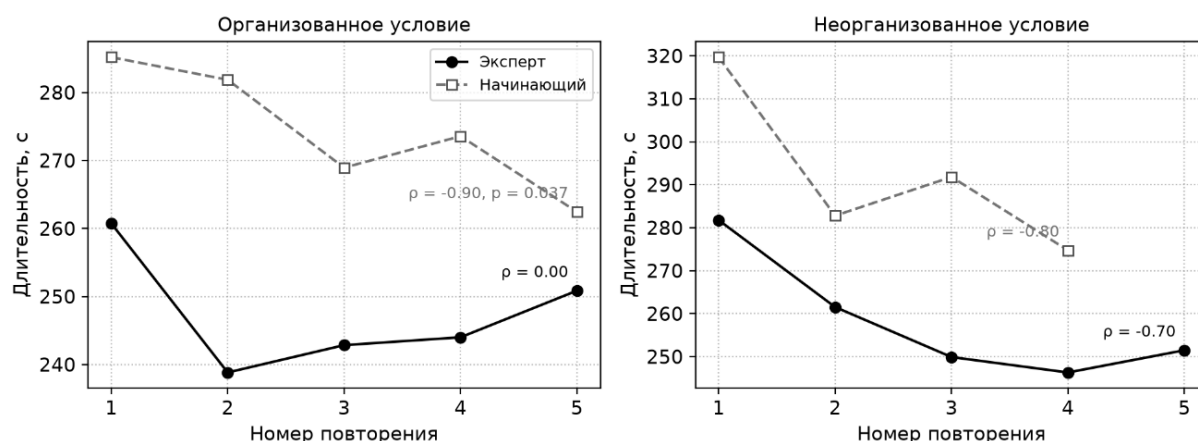


Рисунок 5 – Кривые обучения: длительность выполнения операции по повторениям (слева – организованное, справа – неорганизованное условие)

Figure 5 – Learning curves: task duration over repetitions (left – organized, right – disorganized condition)

Профиль времени фиксации по объектам (Рисунок 6) дополняет количественные показатели. Эксперт распределяет внимание по широкому набору объектов, включая мелкие крепежные элементы — шайбы, гайки, фланцы: он контролирует все этапы сборки. У начинающих операторов доминируют крупные структурные компоненты (опора колеса, колесо), причём в неорганизованном условии концентрация на одном-двух крупных объектах усиливается, что согласуется со снижением энтропии переходов. Схожая картина видна на распределениях точек взгляда (Рисунок 7): в организованном условии фиксации собраны вокруг предсказуемых позиций объектов, в неорганизованном рассеяны по рабочей зоне.

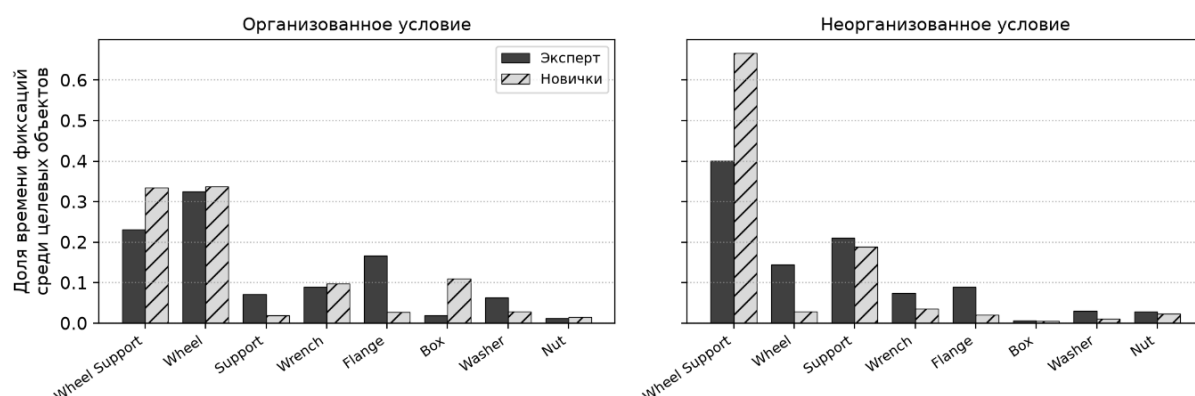


Рисунок 6 – Средние доли времени фиксации по целевым объектам (фоновая зона исключена) для эксперта и начинающих операторов в двух условиях рабочего места

Figure 6 – Mean shares of fixation time on target objects (background zone excluded) for the expert and novices under two workspace conditions

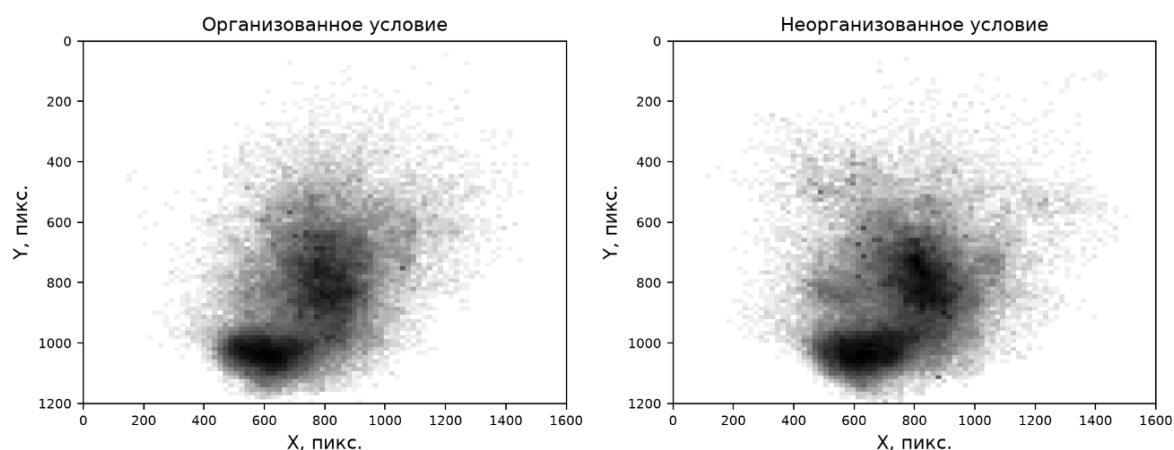


Рисунок 7 – Распределение точек взгляда по кадру (все записи каждого условия; темные области – большая плотность взгляда)

Figure 7 – Distribution of gaze points over the frame (all recordings of each condition; darker areas indicate higher gaze density)

Обсуждение

Главный результат состоит в том, что показатели зрительной стратегии, рассчитываемые автоматически по видеозаписи от первого лица, значимо разделяют экспертное и начинающее выполнение промышленной сборки на уровне отдельных попыток. На предшествующих этапах исследования аналогичные различия были показаны описательно; теперь для каждого показателя известны значимость и величина

эффекта, и методику можно применять как измерительный инструмент с понятными статистическими свойствами.

Частота переключений внимания при сравнении групп дала один из самых больших эффектов ($\delta = 0,83$), при этом ее расчет сводится к подсчету переходов за минуту. Для прикладных систем мониторинга она удобна как первичный индикатор: не требует оценки распределения переходов и не зависит от числа доступных зон интереса.

Рост энтропии в организованном условии может показаться неожиданным: казалось бы, беспорядок должен провоцировать больше переключений. Однако энтропия и частота переключений считаются по переходам между зонами, привязанными к обнаруженным объектам. Когда объекты видимы и расположены предсказуемо, взгляд свободно циркулирует между ними. В неорганизованном условии заметная часть времени уходит на непрерывный поиск по фону, а перемещения взгляда внутри фоновой зоны переходов между целевыми зонами не порождают. Высокая энтропия в данной постановке – признак сформированной стратегии активного сканирования целевых зон, а не рассеянности: рассеянность по фону отражается долей фиксаций вне объектов, тогда как энтропия описывает разнообразие маршрутов между объектами. Низкая энтропия при высокой доле фоновых фиксаций указывает на затрудненный поиск; в таком случае может помочь реорганизация рабочей зоны или система визуальной поддержки оператора. Влияние таких систем на нагрузку и результативность сборочной работы в промышленных условиях активно изучается [13], и объективные поведенческие показатели нужны как раз для того, чтобы оценивать их эффект и выбирать момент вмешательства.

Расхождение между энтропией и частотой переключений в Таблице 3 отражает разную природу этих показателей. Энтропия описывает структуру переходов – насколько разнообразны маршруты взгляда – и растет, как только рабочая зона делает доступными и предсказуемыми больше целевых объектов; поэтому в организованном условии она значимо увеличивается в обеих группах ($\delta = 0,92$ у эксперта и $\delta = 0,78$ у начинающих операторов). Частота переключений описывает темп проверок и зависит не только от расположения объектов, но и от того, насколько оператор способен этим расположением воспользоваться. У эксперта сформированная моторная программа не требует пошагового контроля, и предсказуемая раскладка сразу переходит в более высокий темп (102,0 против 90,9 переключения в минуту). У начинающих операторов прирост темпа в организованном условии тоже наблюдается (62,2 против 52,8), но он мал на фоне разброса между попытками ($\delta = 0,11$) и значимости не достигает: их взгляд по-прежнему подолгу занят поиском и контролем руки в фоновой зоне, так что порядок на рабочем месте разнообразит маршруты взгляда раньше, чем ускоряет их. Таким образом, энтропия реагирует на организацию рабочей зоны у операторов любого уровня, тогда как частота переключений требует уже сформированного навыка и в большей степени характеризует квалификацию.

Ограничения связаны прежде всего с составом выборки: три участника (один эксперт, два начинающих оператора) с неравным числом записей не позволяют переносить выводы на популяцию операторов, и результаты следует рассматривать как статистически подкрепленное разведочное исследование. Второе ограничение – качество детекции. При строгой фильтрации кратковременных и низкоуверенных пересечений «рука – объект» валидных событий взаимодействия у начинающих операторов остается слишком мало для попыточного анализа; по этой причине индекс ЕНС здесь не использовался. Наконец, попадание взгляда в фоновую зону не всегда означает нерелевантный взгляд: оператор может смотреть на руку, на область будущего действия или на объект, который модель не распознала. В дальнейшем планируются расширение выборки, введение модели этапов задачи, повышение устойчивости

детекции взаимодействий и сопоставление показателей с внешними оценками нагрузки – NASA-TLX [14] или экспертной разметкой.

Заключение

На 22 записях реальной сборочной операции показано, что длительность выполнения, доля фиксаций вне целевых объектов, энтропия переходов между зонами интереса и введенная в работе частота переключений внимания значимо различают экспертное и начинающее выполнение, причем величины эффекта по большинству показателей большие. Организация рабочего места меняет структуру переключений внимания в обеих группах. У начинающего оператора обнаружена значимая внутрисессионная динамика обучения: длительность выполнения сокращается от повторения к повторению. Вместе с предшествующими этапами исследования, на которых была выполнена пилотная апробация методики и разработана мультимодальная система регистрации, работа дает статистически проверенные показатели анализа поведения оператора, применимые при обучении персонала и проектировании рабочих зон в промышленных человеко-машинных системах.

Для практического применения показатели целесообразно использовать не по отдельности, а в двух сочетаниях. Для мониторинга обучения приоритетны длительность выполнения и частота переключений внимания: первая фиксирует результат, вторая – структуру поведения, обе значимо разделяют уровни подготовки ($\delta = -0,92$ и $\delta = 0,83$), а частота переключений вычисляется простым подсчетом переходов и пригодна для потоковой обработки; признаком освоения операции служит монотонное сокращение длительности по номеру повторения. Для оценки организации рабочей зоны приоритетна энтропия переходов – единственный показатель, значимо реагирующий на условие рабочего места в обеих группах, – и интерпретировать ее следует совместно с долей фиксаций вне целевых объектов: высокая энтропия при низкой доле внецелевых фиксаций соответствует эффективному сканированию целевых зон, тогда как низкая энтропия при высокой доле внецелевых фиксаций указывает на затрудненный поиск и служит сигналом к реорганизации рабочего места.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Johansson R.S., Westling G., Bäckström A., Flanagan J.R. Eye-hand coordination in object manipulation. *The Journal of Neuroscience*. 2001;21(17):6917–6932. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-17-06917.2001>
2. Hayhoe M., Ballard D. Eye movements in natural behavior. *Trends in Cognitive Sciences*. 2005;9(4):188–194. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.02.009>
3. So W.K.Y., Wong S.W.H., Mak J.N., Chan R.H.M. An evaluation of mental workload with frontal EEG. *PLoS ONE*. 2017;12(4):e0174949. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174949>
4. Kaczorowska M., Plechawska-Wójcik M., Tokovarov M., Krukow P. Automated classification of cognitive workload levels based on psychophysiological and behavioural variables of ex-Gaussian distributional features. *Brain Sciences*. 2022;12(5):542. <https://doi.org/10.3390/brainsci12050542>
5. Papoutsakis K., Bakalos N., Fragkoulis K., Zacharia A., Kapetadimitri G., Pateraki M. A vision-based framework for human behavior understanding in industrial assembly lines. In: *Computer Vision – ECCV 2024 Workshops: Part XIII, 29 September – 04 October 2024, Milan, Italy*. Cham: Springer; 2025. P. 324–342. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91575-8_20

6. Gegenfurtner A., Lehtinen E., Säljö R. Expertise differences in the comprehension of visualizations: a meta-analysis of eye-tracking research in professional domains. *Educational Psychology Review*. 2011;23(4):523–552. <https://doi.org/10.1007/s10648-011-9174-7>
7. Keskin M., Ooms K., Dogru A.O., De Maeyer Ph. Exploring the cognitive load of expert and novice map users using EEG and eye tracking. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020;9(7):429. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070429>
8. Holmqvist K., Nyström M., Andersson R., Dewhurst R., Jarodzka H., van de Weijer J. *Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures*. Oxford: Oxford University Press; 2011. 560 p.
9. Drews M., Dierkes K. Strategies for enhancing automatic fixation detection in head-mounted eye tracking. *Behavior Research Methods*. 2024;56(6):6276–6298. <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02360-0>
10. Krejtz K., Duchowski A., Szmidt T., et al. Gaze transition entropy. *ACM Transactions on Applied Perception*. 2015;13(1):4. <https://doi.org/10.1145/2834121>
11. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1947;18(1):50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
12. Cliff N. Dominance statistics: ordinal analyses to answer ordinal questions. *Psychological Bulletin*. 1993;114(3):494–509. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.3.494>
13. Sahoo P., Biondi F. On the effect of using an augmented reality laser projection operator guidance system on cognitive workload and assembly task performance. *Applied Ergonomics*. 2025;130:104662. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104662>
14. Hart S.G., Staveland L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. In: *Human Mental Workload*. North-Holland: Elsevier Science Publishers; 1988. P. 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Гурбанов Кянан Айдын оглы, магистр, аспирант кафедры компьютерной инженерии, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан. **Kanan A. Gurbanov**, Master of Science, Postgraduate at the Department of Computer Engineering, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan.
e-mail: gurbanov.kanan02@gmail.com
ORCID: [0009-0005-1840-9685](https://orcid.org/0009-0005-1840-9685)

Статья поступила в редакцию 08.07.2026; одобрена после рецензирования 23.09.2026; принята к публикации 12.10.2026.

The article was submitted 08.07.2026; approved after reviewing 23.09.2026; accepted for publication 12.10.2026.