

УДК 004.94; 004.67; 004.031.43

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.048](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.048)

Метод интеллектуального управления наведением светового луча на динамические объекты сценического пространства

Л.Н. Теряев✉

Государственный университет «Дубна», Дубна, Российская Федерация

Резюме. В работе представлен инновационный метод интеллектуального управления наведением светового луча на динамические объекты в сценическом пространстве. Разработанный подход преодолевает ограничения традиционных ручных и аппаратно-зависимых систем слежения за счет интеграции передовых технологий, включая компьютерное зрение, машинное обучение и концепцию цифрового двойника сцены. Ключевым аспектом метода является создание единой системы координат, связывающей физическое пространство с его цифровой копией, что позволяет существенно повысить точность наведения, минимизировать временные задержки и реализовать централизованное групповое управление множеством осветительных приборов. Для прогнозирования траектории движения объектов в реальном времени применяется фильтр Калмана, а для точного преобразования координат между системами зрения и роботизированных приборов используются матрицы гомографии. Апробация метода в условиях реальной сцены подтвердила его высокую эффективность. Средняя погрешность наведения составила не более 15 см при максимальном отклонении 29 см (3 % от масштаба полигона), а также была доказана стабильность слежения за объектами, движущимися со скоростью до 2 м/с. Метод демонстрирует не только высокую точность и масштабируемость, но и значительный потенциал для сбора и представления данных о динамике сцены в цифровой модели для аналитики и принятия решений.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, сценическое освещение, компьютерное зрение, цифровой двойник, фильтр Калмана, гомография, DMX, трекинг объектов, автоматизация управления светом.

Для цитирования: Теряев Л.Н. Метод интеллектуального управления наведением светового луча на динамические объекты сценического пространства. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2095> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.048

Method of intelligent control for directing a light beam onto dynamic objects in stage space

L.N. Teryaev✉

Dubna State University, Dubna, the Russian Federation

Abstract. This paper presents an innovative method for the intelligent control of light beam targeting on dynamic objects in stage space. The developed approach overcomes the limitations of traditional manual and hardware-dependent tracking systems by integrating advanced technologies, including computer vision, machine learning, and the concept of a digital twin of the scene. A key aspect of the method is the creation of a unified coordinate system that links the physical space with its digital copy, which significantly improves targeting accuracy, minimizes time delays, and enables centralized group control of multiple lighting fixtures. A Kalman filter is used to predict object trajectories in real-time, while homography matrices are employed for precise coordinate transformation between the vision systems and the robotic fixtures. Testing of the method in a real-world stage environment confirmed its high effectiveness. The average targeting error was no more than 15 cm with a maximum deviation of 29 cm (3 % of the test area scale), and stable tracking of objects moving at speeds of up to 2 m/s was

demonstrated. The method shows not only high accuracy and scalability but also significant potential for collecting and representing data on scene dynamics in a digital model for analytics and decision-making.

Keywords: intelligent control, stage lighting, computer vision, digital twin, Kalman filter, homography, DMX, object tracking, lighting control automation.

For citation: Teryaev L.N. Method of intelligent control for directing a light beam onto dynamic objects in stage space. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=2095> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.048

Введение

Event-индустрия активно развивается и требует новых технологий для оптимизации базовых операций. Методы управления, используемые в сценическом освещении, остаются практически неизменными в течение последних 30 лет. Методы ручного управления, основанные на изменении отдельных характеристик оборудования, не позволяют эффективно масштабировать количество управляемого оборудования в рамках одного пульта управления. Некоторые задачи, такие как слежение световым лучом за динамическими объектами на сцене, до сегодняшнего дня решаются вручную.

Технологии машинного обучения и компьютерного зрения сегодня позволяют эффективно решать многие задачи и в интеграции с технологией цифрового двойника позволяют реализовывать новый подход к управлению сценическим оборудованием [1]. Управление на основе логических конструкций позволяет кратно оптимизировать время, необходимое для управления сценическим оборудованием и улучшить воспроизводимость процессов.

Задача слежения световыми приборами за актерами, как правило, решается с использованием специализированных точечных прожекторов, наводимых оператором вручную. В случае использования управляемых посредством DMX¹ устройств, наведение производится ручным изменением каналов наклона и поворота, что удается только самым опытным операторам.

Существует большое количество подходов к решению данной задачи, используются различные программные и аппаратные решения. Распространенным является подход, использующий инфракрасный диапазон. Инфракрасная камера отслеживает положение инфракрасных излучателей-меток, расположенных на актерам [2]. В работе Ли Пин и др. описывается использование инфракрасных чернил, с помощью которых на одежду актеров наносятся идентификационные изображения [3]. Используются ультразвуковые датчики для определения движения в определенной зоне сцены [4, 5] и ультразвук совместно с радиоканалом [6]. Используются также камеры глубины и лидары [7]. Для решения задачи в том числе используются технологии радиопозиционирования на ультра-широких частотах и им подобные [8]. В исследованиях предлагалось использовать сигнал радиомикрофонов для триангуляции координат актера [9]. Все представленные методы требуют наличия дополнительного аппаратного обеспечения, что значительно снижает возможность их глобального применения.

Задача автоматического наведения роботизированных осветительных приборов на динамические объекты без использования специальных меток при сохранении субдециметровой точности и минимальной латентности в реальном времени до настоящего времени не имеет удовлетворительного решения на основе только компьютерного зрения.

¹ American National Standard. ANSI E1.11-2008 (R2018). Entertainment Technology – USITT DMX512-A Asynchronous Serial Digital Data Transmission Standard for Controlling Lighting Equipment and Accessories.

В отличие от известных безмаркерных систем [10, 11], требующих индивидуальной калибровки каждого осветительного прибора относительно камеры, предлагаемый метод использует единую глобальную систему координат сцены (цифровой двойник), в которой все приборы и камера калибруются один раз, а также реализует механизмы для минимизации погрешности наведения на динамические объекты и предотвращения переключивания световых приборов в процессе слежения.

Это позволяет добавлять новые приборы без повторной калибровки системы зрения; реализовывать централизованное групповое управление множеством приборов с автоматическим решением задачи передачи объекта между зонами ответственности без риска переключивания механики; существенно снизить время разворачивания системы на новой площадке. Помимо этого, предлагается алгоритм предсказания ускорения с эмпирическими коэффициентами затухания, специально подобранными под инерцию механики прожекторов.

Методология

Разрабатываемая система управления сценическим освещением интегрирует технологии компьютерного зрения, машинного обучения и цифрового двойника сцены для автоматического слежения световыми приборами за актерами и другими динамическими объектами. Такой подход позволяет отказаться от специализированных меток, датчиков или иных сложных систем позиционирования, обеспечивая при этом высокую точность, предсказуемость и воспроизводимость действий, при этом снижая себестоимость решения.

Метод интеллектуального управления реализует последовательную обработку данных: выход каждого этапа является входом для следующего, что минимизирует накопление ошибок и задержек. В общем виде схема потоков данных между этапами изображена на Рисунке 1.

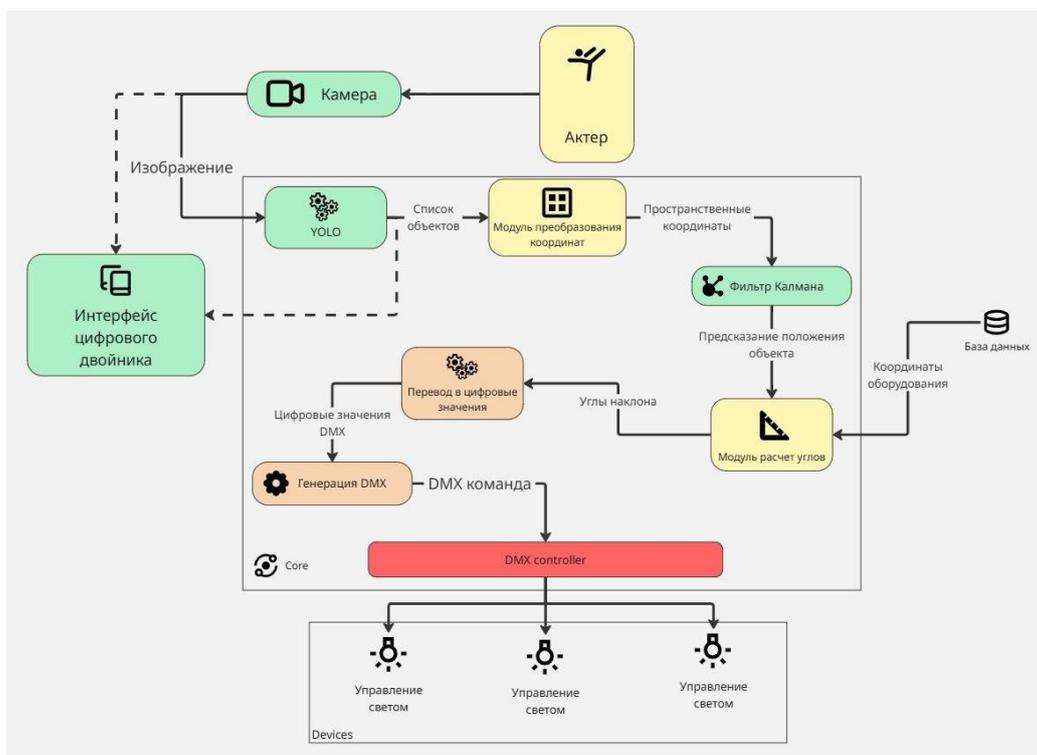


Рисунок 1 – Схема потоков данных метода
 Figure 1 – Method data flow diagram

Метод принимает на вход координаты наблюдаемого объекта, выходными сигналами являются цифровые значения наклона и поворота светового устройства. Основные этапы работы метода описаны ниже.

Преобразование экранных координат в координаты сценического пространства. Задача данного этапа заключается в том, чтобы правильно преобразовать экранные координаты в координаты сценического пространства.

Для этого применяется матрица гомографии – математическая модель, описывающая перспективное искажение между двумя плоскостями [12]. Гомография позволяет корректно проецировать точки с изображения на целевую плоскость, учитывая угол съемки, перспективу и возможные искажения.

Пусть заданы экранные точки:

$$p_i = [x_i, y_i]^T}_{i=1}^n \quad (1)$$

и соответствующие точки сцены:

$$s_i = [X_i, Y_i]^T}_{i=1}^n. \quad (2)$$

Преобразование экранной точки в сцену задается формулой:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \sim H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где знак « \sim » означает пропорциональность, а H – заранее полученную матрицу гомографии.

Для практической реализации в системе использовалась библиотека OpenCV [13] (функция `cv2.findHomography`), которая поддерживает устойчивые алгоритмы оценки гомографии (методы DLT [14], RANSAC [15], LMedS [16]) и позволяет исключить выбросы, вызванные ошибками детекции точек.

Фильтрация и предсказание положения объекта на сцене. Для реализации функции предиктивной аналитики используется Фильтр Калмана – классический метод предсказания, основанный на линейной модели движения и гауссовском шуме [17]. Имеет высокую вычислительную эффективность и точность.

На вход подсистема принимает координаты движущегося объекта, далее предсказывает на основе полученных данных положение объекта в следующий момент времени, после чего корректирует свое предсказание, сравнивая его с измеренным положением, возвращая предсказанные координаты. Алгоритм работы предсказания представлен на Рисунке 2.

Фильтр отслеживает движение объекта в 2D с учетом ускорения. Вектор состояния:

$$X = [x \ v_x \ a_x \ y \ v_y \ a_y]^T, \quad (4)$$

где x, y – координаты объекта; v_x, v_y – скорости; a_x, a_y – ускорения.

Функция перехода $f(x, \Delta t)$ задается матрицей перехода F :

$$X_k = F \cdot X_{k-1}, \quad (5)$$

где

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0,3\Delta t^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & speed_{modifier} & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,85 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0,3\Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & speed_{modifier} & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,85 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В формуле используются эмпирические коэффициенты 0,3, 0,85 и speed_modifier, которые управляют динамикой системы:

- 0,3 уменьшает влияние ускорения на изменение позиции, делая трекинг менее чувствительным к шуму;
- 0,85 описывает затухание ускорения, сглаживая резкие изменения;
- speed_modifier изменяет скорость системы, регулируя «инерцию» движения.

Эти параметры подбираются вручную для каждого устройства и могут отличаться в зависимости от характеристик конкретного оборудования; их значения выбираются эмпирически на основе наблюдений и тестирования.

Поскольку измеряются только координаты (x,y) . Соответственно, функция наблюдения:

$$z_k = H \cdot x_k, \quad (7)$$

где

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Далее идет расчет шума измерений R :

$$R = \begin{bmatrix} \sigma^2/2 & 0 \\ 0 & \sigma^2/2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где σ – стандартное отклонение измерений.

Шум процесса Q создается с помощью модели дискретного белого шума [18]. Он имеет блочную структуру для осей x и y :

$$Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_y \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Каждая из подматриц имеет размерность 3×3 и создается с учетом ускорения. Далее идет этап обновления и предсказания. Коррекция происходит по следующей формуле:

$$x_k = x_k + K_k(z_k - Hx_k), \quad (11)$$

где K_k – матрица Калмана, автоматически рассчитываемая фильтром.

Предсказание:

$$x_{k+1} = F \cdot x_k. \quad (12)$$

Для реализации данного этапа использована библиотека, разработанная в рамках проекта, которая оптимизирована под высокую частоту обновления данных и интеграцию с модулями компьютерного зрения и управления сценическим оборудованием.

Расчет расстояния и угловой разницы. После фильтрации и предсказания позиции объекта внутри сценического пространства необходимо рассчитать расстояние и угловую разницу между источником света и наблюдаемым объектом.

Расчет расстояния. Эта процедура необходима для расчета угла наклона светового оборудования для точного наведения на объект. Расчет расстояния происходит по следующей формуле:

$$D = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}, \quad (13)$$

где Δx – расстояние между наблюдаемым объектом и световым оборудованием по оси X ; Δy – разница высот между наблюдаемым объектом и световым оборудованием; Δz – расстояние между наблюдаемым объектом и световым оборудованием по оси Z .

Расчет угловой разницы. Расчет угловой разницы необходим в следующем этапе для расчета угла поворота источника света для точного наведения на объект. Расчет данного значения происходит по следующей формуле:

$$\alpha = (H - \alpha_0), \quad (14)$$

где H – результат вычисления угла между положительным направлением оси Z и вектором, направленным от лампы к объекту в диапазоне $[-180, 180]$, полученное по следующей формуле:

$$H = \text{atan}(\Delta x, \Delta z); \quad (15)$$

α_0 – начальный угол поворота лампы. Он задает базовое направление лампы в системе координат.

Возвращаемое значение находится в диапазоне $[-180, 180]$, что удобно для дальнейших вычислений.

Расчет угловых координат. В системах автоматического наведения и трекинга критически важную роль играет точный расчет угловых координат объекта относительно источника света или камеры. Этот процесс включает преобразование пространственных координат в угловые параметры, определяющие направление на объект в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Расчет углового параметра для вертикальной плоскости. Расчет происходит по следующей формуле:

$$P = \text{acos}\left(\frac{\Delta y}{D}\right), \quad (16)$$

где D – расстояние между объектом наблюдения и источником света, полученное на предыдущем этапе.

Расчет углового параметра для горизонтальной плоскости. Данный этап учитывает возможность инверсии управления светового оборудования. Расчет углового параметра происходит по следующим формулам.

В случае, если управление не инвертировано, формула расчета будет представлена в таком виде:

$$A = \begin{cases} H & |H \geq 0 \\ 360 + H & |H < 0 \end{cases} \quad (17)$$

В обратном случае:

$$A = \begin{cases} 360 - H & |H \geq 0 \\ -H & |H < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Результатом выполнения расчета будет число в диапазоне $[0, 360]$.

Преобразование угловых координат в цифровые значения DMX. Ключевая задача этого этапа – учесть аппаратные ограничения прибора (минимальные и максимальные углы), специфику его DMX-профиля (количество каналов для грубого и точного позиционирования) и особенности геометрии сцены. Результатом работы является цифровое DMX-значение, которое, проходя через контроллер или световой пульт, передается на сервоприводы или шаговые двигатели прибора.

Для корректной работы светового прибора необходимо учитывать:

- физические ограничения прибора (минимальные и максимальные рабочие углы поворота);
- специфику DMX-профиля (количество каналов для грубого и точного позиционирования);
- особенности геометрии сцены.

Расчет цифрового значения поворота и наклона. Для расчета DMX-значений светового оборудования используется стандартная линейная формула:

$$v = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \cdot 2^{8n}, \quad (19)$$

где θ – полученный угол поворота или наклона устройства; θ_{max} и θ_{min} – физические ограничения прибора; n – количество каналов, используемых для управления этим параметром; v – цифровое значение, которое передается на контроллер DMX.

Программная реализация метода была проведена с использованием языка программирования Python и высокопроизводительных библиотек OpenCV и NumPy. Библиотека OpenCV обеспечивала захват и обработку кадров видеопотока в реальном времени, включая операции преобразования координат, а NumPy использовалась для эффективных вычислений с многомерными массивами и матрицами, что позволило существенно ускорить обработку данных и снизить нагрузку на систему.

Метод хорошо показал себя в работе и уже интегрирован в общую систему управления световым оборудованием [1].

Результаты

Апробация метода заключается в тестировании основных характеристик полученного программно-аппаратного комплекса и оценке качества внедрения метода для решения реальных задач. Все замеры проводились на реальной сценической площадке, что позволило оценить работу системы в условиях, максимально приближенных к практическим. Проведение тестирования метода изображено на Рисунке 2.

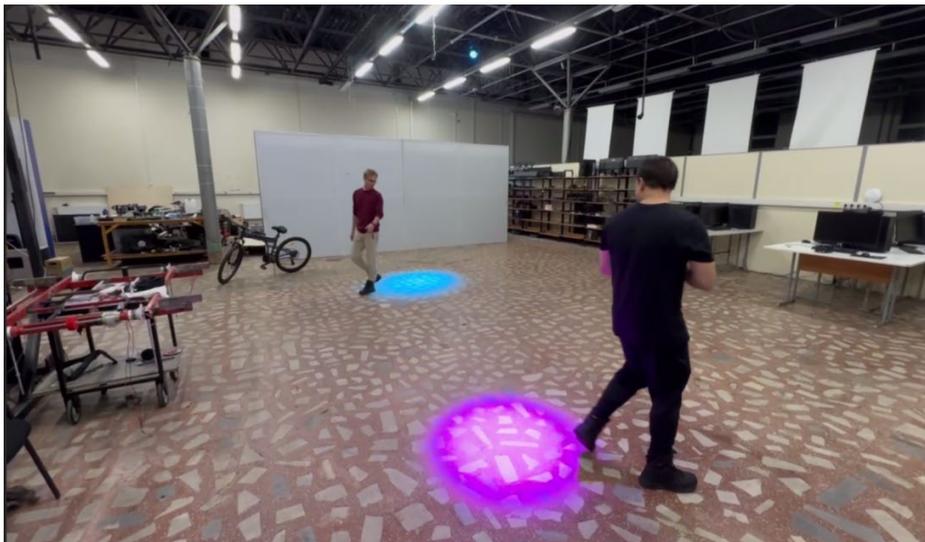


Рисунок 2 – Проведение испытания метода
Figure 2 – Conducting a method test

Реализация автоматизированного тестирования [19] позволила проводить площадное тестирование погрешности наведения и строить карты полигона. Суть метода

заключается в разбиении полигона на определенное количество зон, в центр каждой из которых наводится луч и проводится замер погрешности.

Результат проведенных замеров представлен на Рисунке 3.

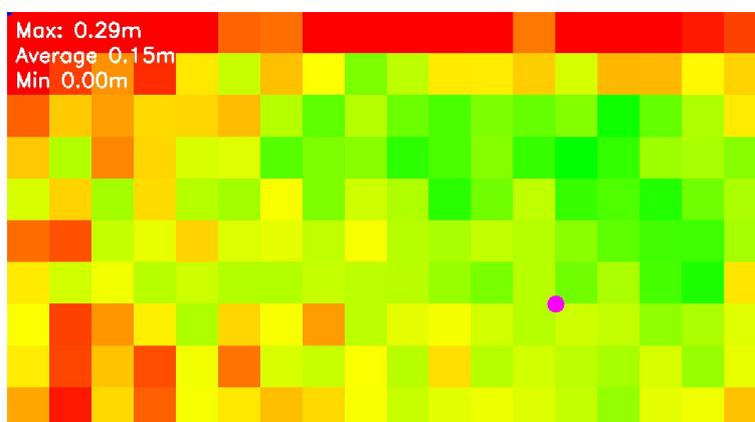


Рисунок 3 – Тепловая карта погрешности для тестируемой лампы
Figure 3 – Heat map of the error for the lamp under test

Результаты тестирования показали, что точность падает линейно, относительно расстояния до светового оборудования. К тому же, замеры показывают, что средняя погрешность составляет 15 см, а максимальная погрешность не превышает 29 см, что составляет 3 % в масштабах полигона.

Для выявления данной закономерности был проанализирован ряд замеров. Анализировалось изменение показателей точности в рамках расстояния точки падения луча от прибора до целевой точки.

$$\varepsilon = |p_t - p_f| = \sqrt{(x_t - x_f)^2 + (y_t - y_f)^2},$$

где p_t – целевая точка, а p_f – точка падения светового луча.

В результате был получен график погрешности наведения относительно расстояния от прибора, график представлен на Рисунке 4.

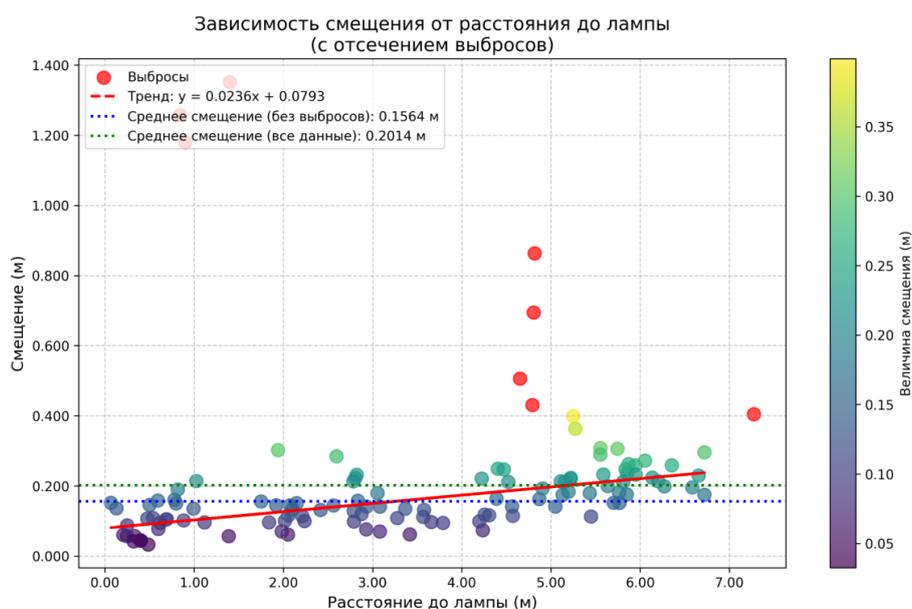


Рисунок 4 – График зависимости погрешности наведения луча от удаления прибора
Figure 4 – Graph of the dependence of the beam pointing error on the distance of the device

На основе полученных данных была выведена предельная зона эффективной работы прибора. Для заданных параметров системы дальность составила 8 метров. В этом диапазоне погрешность наведения в среднем составляет 0,16 сантиметров, что составляет 2 % в масштабах полигона.

Также было проведено тестирование точности метода в зависимости от скорости движения наблюдаемого объекта. График с результатом испытаний изображен на Рисунке 5.

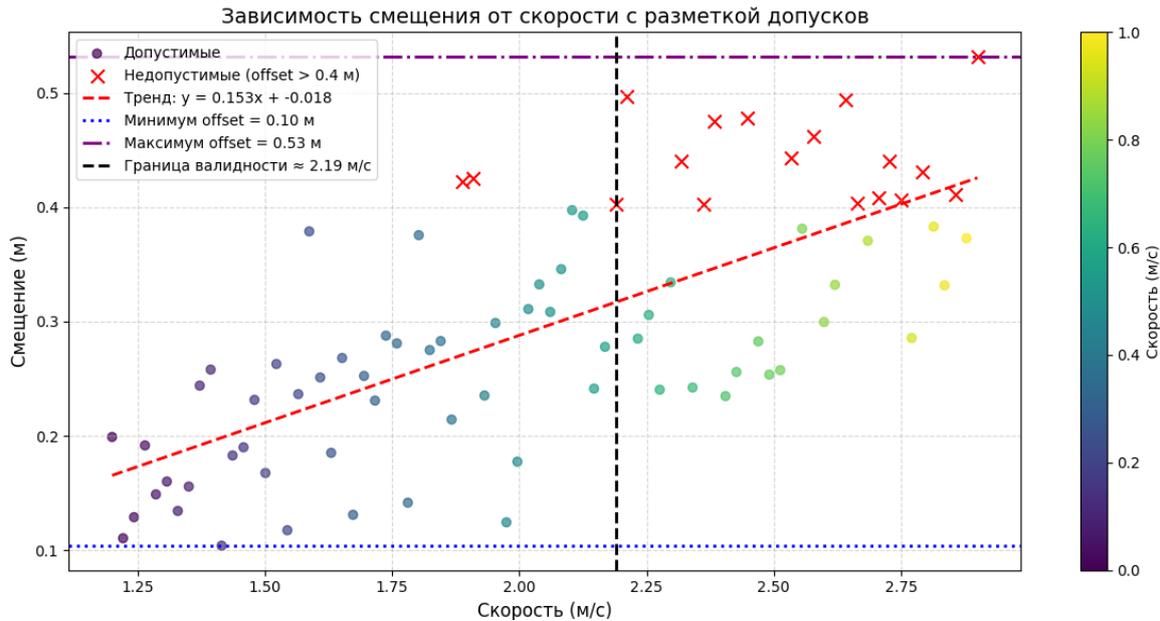


Рисунок 5 – Процесс тестирования слежения за динамическим объектом
Figure 5 – Dynamic object tracking testing process

Исходя из полученных данных, для заданного оборудования полигона пороговым значением эффективного слежения за динамическим объектом является скорость 2 м/с.

Заключение

Проведенный анализ существующих решений для слежения световым лучем за динамическими объектами показал отсутствие решений для реализации безмаркерного, переносимого между площадками метода слежения за динамическими объектами, учитывающего временную задержку реакции светового оборудования.

Предложен метод интеллектуального управления наведением светового луча на динамические объекты сценического пространства. Новизна подхода заключается в использовании единой системы координат для всех компонентов системы и интеграции в процесс слежения предиктивного алгоритма. Метод включает алгоритмы калибровки и преобразования координат для камеры, световых устройств и координат сцены. Использование единой системы координат сцены позволяет достигать повторяющийся результат наведения при переносе световой партитуры на другую площадку без необходимости повторного написания светового представления.

Предложены методы управления на основе предложенного алгоритма, позволяющие проводить одновременное отслеживание множества целей. Предложен метод предсказания траектории движения актера для минимизации отставания светового луча. Реализована логика для обхода физических ограничений светового оборудования по переключиванию светового луча.

Предложенный метод позволяет реализовать полностью безмаркерный трекинг при сохранении ошибки ≤ 15 см на дистанциях до 8–10 м в реальных сценических условиях и в отличие от существующих методов позволяет сохранять допустимую погрешность слежения для объектов со скоростью до 2 м/с. Проведенное тестирование показывает эффективность метода и указывает на возможные ограничения. Отдельные алгоритмы и подходы могут использоваться для создания цифрового двойника сценического пространства и реализации других методов управления на его основе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Теряев Л.Н., Дорохин В.А., Подгорный С.А., Дорохин А.А. Цифровой двойник сценического пространства. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.016>
Teryaev L.N., Dorokhin V.A., Podgornyi S.A., Dorokhin A.A. Digital Twin of the Stage Space. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.016>
2. Puljiz D., Vasilache A.-G., Mende M., Hein B. Inside-Out Infrared Marker Tracking via Head Mounted Displays for Smart Robot Programming. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.16017> [Accessed 15th September 2025].
3. Ping L., Shujie Ch., Denghui W., et al. Stage Actor Tracking Method Based on Infrared Ink Marking. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*. 2025;52(1):50–58. <https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-9497.2025.01.006>
4. Guo Q., Bai Sh., Dong Y., Bao N. The Automatic Tracking System of Near Stage Lighting. In: *2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, 20–22 May 2016, Chongqing, China*. IEEE; 2016. P. 87–90. <https://doi.org/10.1109/ITNEC.2016.7560325>
5. Feng Ch., Yang L., Rozenblit J.W., Beudert P. Design of a Wireless Sensor Network Based Automatic Light Controller in Theater Arts. In: *14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS'07), 26–29 March 2007, Tucson, AZ, USA*. IEEE; 2007. P. 161–170. <https://doi.org/10.1109/ECBS.2007.30>
6. Hay T.N., Weiss S. Design and Implementation of an Automatic Followspot Tracking System. Strathprints: The University of Strathclyde institutional repository. URL: <https://strathprints.strath.ac.uk/39331/1/hay04a.pdf> [Accessed 15th September 2025].
7. Lv Ch., Yang L., Li M., Yin J. Stage Actor Positioning Method Based on RealSense Point Cloud. In: *2019 International Joint Conference on Information, Media and Engineering (IJCIME), 17–19 December 2019, Osaka, Japan*. IEEE; 2019. P. 188–192. <https://doi.org/10.1109/IJCIME49369.2019.00045>
8. Zhang Y.-X., Shen Y.-R., Zhang W.-W., Zhu Z.-Q., Ma P.-F. Design of an Interactive Spatial Augmented Reality System for Stage Performance Based on UWB Positioning and Wireless Triggering Technology. *Applied Sciences*. 2019;9(7). <https://doi.org/10.3390/app9071318>
9. Hill A.J., Lane K.K., Rosenthal A.P., Gand G. Live Event Performer Tracking for Digital Console Automation Using Industry-Standard Wireless Microphone Systems. In: *135th Audio Engineering Society Convention Paper, 17–20 October 2013, New York, NY, USA*. 2013. P. 1–13.
10. Bai Sh., Zhang J. Research on Stage Automatic Light-Following System Based on Trajectory Prediction. In: *2021 International Conference on Culture-Oriented Science & Technology (ICCST), 18–21 November 2021, Beijing, China*. IEEE; 2021. P. 543–546. <https://doi.org/10.1109/ICCST53801.2021.00118>

11. Prakash D., Nigel K.G.J. Automatic Human Tracking Theatrical Spotlight. In: *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 19–20 March 2015, Coimbatore, India*. IEEE; 2015. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICIIECS.2015.7192974>
12. Ефимов А.И., Логинов А.А., Никифоров М.Б., Новиков А.И. Построение матрицы гомографии на основе произвольного количества ключевых точек. В сборнике: *Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 18-й Международной научно-технической конференции, 26–28 октября 2015 года, Рязань, Россия*. Рязань: Научно-техническое издательство «Горячая линия-Телеком»; 2015. С. 137–139.
13. Круглик Е.Д. Машинное зрение на основе OpenCV. В сборнике: *Индустрия 1С: Сборник статей II региональной научно-практической конференции, 28 ноября 2023 года, Брянск, Россия*. Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет; 2023. С. 211–217.
Kruglik E.D. Machine Vision Based on OpenCV. In: *Industriya 1S: Sbornik statei II regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 28 November 2023, Bryansk, Russia*. Bryansk: Bryansk State Technological University of Engineering; 2023. P. 211–217. (In Russ.).
14. Henry S., Christian J.A. Optimal DLT-Based Solutions for the Perspective-n-Point. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.14164> [Accessed 15th September 2025].
15. Nousias G., Delibasis K.K., Maglogiannis I.G. Intelligent Sampling Consensus for Homography Estimation in Football Videos Using Featureless Unpaired Points. *IEEE Access*. 2025;13:187843–187857. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3627538>
16. Rousseeuw P.J., Leroy A.M. *Robust Regression and Outlier Detection*. New York, Chichester: Wiley; 2003. 329 p.
17. Pei Y., Biswas S., Fussell D.S., Pingali K. An Elementary Introduction to Kalman Filtering. *Communications of the ACM*. 2019;62(11):122–133. <https://doi.org/10.1145/3363294>
18. Dombry C. Discrete Approximation of Stable White Noise – Application to Spatial Linear Filtering. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/0903.1552> [Accessed 15th September 2025].
19. Теряев Л.Н., Дорохин В.А., Евсеева Е.С., Максименко К.М. Метод автоматической оценки погрешности наведения светового луча на основе компьютерного зрения. В сборнике: *Научный форум: Технические и физико-математические науки: Сборник статей по материалам LXXXVIII международной научно-практической конференции: № 8 (88), сентябрь 2025 года, Москва, Россия*. Москва: МЦНО; 2025. С. 4–11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Теряев Лев Николаевич, аспирант, руководитель студии инженерного моделирования, Государственного университета «Дубна», Дубна, Российская Федерация. **Lev N. Teryaev**, Postgraduate, Head of the Engineering Modeling Studio, Dubna State University, Dubna, the Russian Federation.
e-mail: vr.lab@uni-dubna.ru

Статья поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 28.11.2025.

The article was submitted 06.10.2025; approved after reviewing 24.11.2025; accepted for publication 28.11.2025.