

Исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига при дуговой траектории телевизионной камеры

П. С. Сердюков, К. Е. Румянцев

Южный федеральный университет

Аннотация: В статье представлено исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига при дуговой траектории перемещения телевизионной камеры. Рассмотрены основные источники ошибок: радиационные и шумовые искажения видеопотока, неточности выделения контуров, субпиксельные отклонения центров окружностей, геометрические погрешности движения перемещения камеры и вариации её углового положения. Построена модель влияния этих факторов на результирующую точность определения высоты головок. Проведена оценка чувствительности высотных измерений к ключевым параметрам системы. Показано, что метод параллакс-сдвига сохраняет метрологическую надёжность при типовых эксплуатационных отклонениях, характерных для условий АЭС.

Ключевые слова: параллакс-сдвиг; разновысотность тепловыделяющих сборок; бесконтактные измерения; погрешности измерений; дуговое перемещение камеры; субпиксельное выделение; преобразование Хафа; техническое зрение; радиационные шумы; устойчивость алгоритма; квазистереопара; геометрические искажения.

Для цитирования: Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига при дуговой траектории телевизионной камеры // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 4. С. 92–109. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Сердюков П. С., Румянцев К. Е., 2025

Статья поступила в редакцию 28.11.2025;
переработанный вариант – 01.12.2025;
принята к публикации 03.12.2025.

1. Введение

Бесконтактный контроль геометрических параметров технически сложных и потенциально опасных объектов является одним из ключевых направлений развития современных систем технического зрения. На атомных электростанциях особое значение имеет задача измерения разновысотности головок тепловыделяющих сборок (ТВС), поскольку отклонения в геометрии активной зоны способны привести к ухудшению условий теплоотвода, локальному росту температур твэлов, перераспределению расхода теплоносителя и связанного с ним нейтронного поля, повышению неравномерности энерговыделения, что в совокупности может привести к нарушению регламентных условий

эксплуатации и ускоренному снижению ресурса оборудования. В таких условиях требуется метод, обеспечивающий высокую точность, устойчивость к внешним воздействиям и возможность применения без вмешательства в конструкцию реакторных систем.

Одним из наиболее перспективных подходов для этих целей является метод параллакс-сдвига, реализуемый на основе анализа смещения проекций объектов между последовательными кадрами телевизионного видеопотока при дуговом перемещении камеры [1]. Этот подход относится к классу методов монокулярной стереоскопии, где стереобаза формируется за счёт движения телевизионной камеры, а последовательные кадры образуют квазистереопару. Подобные методы успешно применяются в техническом зрении и робототехнике благодаря высокой метрологической эффективности и независимости от калиброванных стереосистем.

Однако использование метода параллакс-сдвига в условиях АЭС сопряжено с рядом сложностей. Телевизионный видеопоток подвержен воздействию радиации, приводящей к появлению шумов типа «соль-перец», деградации чувствительных элементов матрицы и падению контрастности. Исследования, посвящённые влиянию радиации на параметры ПЗС-сенсоров, показывают существенное увеличение количества «горячих» пикселей и нелинейных искажений в течение эксплуатации [2]. Эти факторы затрудняют выделение контуров головок ТВС и нарушают условия субпиксельного анализа.

Дополнительные погрешности вносят механические воздействия: вибрации перегрузочной машины, дрейф и наклон оптической оси телевизионной камеры относительно её номинального положения, а также отклонения фактической дуги движения камеры от расчётной теоретической траектории. Исследования устойчивости систем машинного зрения показывают, что даже незначительное смещение угла обзора приводит к накоплению ошибок при стереометрической реконструкции глубины [3]. В условиях АЭС эти воздействия неизбежны и должны быть учтены в модели погрешностей.

К критически значимым относятся и ошибки, возникающие на этапе выделения контуров. Преобразование Хафа, широко применяемое для детекции окружностей [4], при высоком уровне шумов демонстрирует снижение точности радиуса и координат центра. Это напрямую влияет на вычисление смещения Δx между кадрами, от которого зависит точность определения высоты Δh по параллаксу. Для компенсации этого эффекта применяется субпиксельная аппроксимация контуров, однако и она чувствительна к разрушению формы и снижению контрастности.

Важным аспектом является влияние геометрических параметров системы: радиуса дуги перемещения, высоты подвеса, угла обзора и фокусного расстояния телевизионной камеры. Чувствительность метода параллакса к этим параметрам неоднократно подтверждена в исследованиях по движущемуся стереозрению и реконструкции глубины [5, 6]. Для задач АЭС необходимо понимать, как именно отклонения в движении камеры трансформируются в ошибку Δh , и какие параметры оказывают наибольшее влияние.

Таким образом, задача анализа погрешностей метода параллакс-сдвига при дуговом перемещении телевизионной камеры является ключевой для подтверждения метрологической значимости метода и оценки его работоспособности в реальных эксплуатационных условиях. В данной работе исследуются источники ошибок, формируется математическая модель погрешностей, проводится оценка чувствительности и анализируется комплексное влияние радиационных, шумовых, оптических и механических факторов на точность разновысотных измерений. Результаты исследования позволяют определить границы применимости метода параллакс-сдвига, оптимальные условия работы и рекомендации по снижению погрешностей, что является необходимым шагом для внедрения технологии в практику контроля разновысотности головок ТВС на атомных электростанциях.

1.1 Анализ погрешности из-за неточности позиционирования телевизионной камеры

Метод параллакс-сдвига, реализуемый в данной работе, требует высокой точности геометрического размещения телевизионной камеры, перемещающейся по дуговой траектории относительно сцены с ТВС. Камера движется по окружности, сохраняя направленность оптической оси на центр исследуемой области. Любое отклонение от идеального положения может привести к искажению геометрических параметров квазистереопар и, как следствие, к ошибкам в определении высот [7].

Рассмотрим декартову систему координат O_{xyz} , в которой ось O_y направлена вдоль оси ТВС (вниз к активной зоне), а плоскость O_{xz} совпадает с горизонтальной плоскостью перемещения телевизионной камеры. Начало координат O совмещено с геометрическим центром контролируемой ячейки решётки активной зоны. В этой системе координат x_k, y_k, z_k обозначают координаты центра объектива телевизионной камеры в k -м кадре.

В идеальном случае траектория перемещения центра объектива представляет собой дугу окружности радиуса R в плоскости O_{xz} , поэтому координаты центра объектива в k -м положении описываются формулами

$$x_k = R \cdot \sin(\theta_k), z_k = R \cdot \cos(\theta_k), y_k = 0,$$

где R – радиус дуги перемещения камеры, а θ_k – угловое положение камеры k -м кадре O_z .

Оптическая ось камеры в идеальной конфигурации направлена строго в центр «соты» ТВС, под «сотой» далее понимается ячейка пространственной решётки активной зоны, в центре которой расположена головка контролируемой сборки. Нарушение этой конфигурации (смещение радиуса траектории или углового положения камеры) приводит к погрешностям в расчётах: даже незначительное отклонение радиуса или угла может существенно повлиять на величину базиса стереопары и, как следствие, на оцениваемую высоту.

Базис B в данном контексте – это эффективное расстояние между двумя положениями камеры, по которым формируется квазистереопара при расчёте параллакс-сдвига. Для дуговой траектории при номинальном радиусе R и угловом шаге между двумя кадрами $\Delta\theta_{\square} = \Delta\theta_{k_2} - \Delta\theta_{k_1}$ базис определяется выражением

$$B = 2R \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right).$$

Здесь $\Delta\theta$ – заданное угловое смещение между двумя положениями телевизионной камеры, используемыми для формирования квазистереопары. На практике радиус траектории может отличаться от номинального значения R на величину ΔR из-за неточностей позиционирования перегрузочной машины (фактический радиус $R + \Delta R$). При малых углах $\Delta\theta$ такое отклонение радиуса приводит к относительной ошибке базиса, которая с хорошей точностью оценивается как

$$\frac{\Delta B}{B} \approx \frac{\Delta R}{R}$$

При $R=500$ мм и $\Delta R=5$ мм, относительная ошибка базиса составит 1%. Это оказывает существенное влияние на результат измерения, так как высота объекта измерения далее определяется по формуле стереозрения и пропорциональна произведению $f \cdot B$, а относительная ошибка базиса непосредственно передаётся в относительную ошибку по высоте.

$$Z = \frac{f \cdot B}{d \cdot s},$$

где:

Z – вычисляемая высота (относительно базовой головки);

f – фокусное расстояние;

d – величина диспарантности в пикселях;

s – размер пикселя на матрице.

Видно, что ошибка базиса линейно влияет на итоговую погрешность измерения Z .

При типичных параметрах $f=8.0$ мм, $B=200$ мм, $s=0.00465$ мм и $d=20$ пикселей, получаем $Z \approx 17200$ мм. Относительная ошибка в 1% базиса B даёт $\Delta Z \approx 0.01 \cdot 17200 \approx 172$ мм. Это в несколько раз превышает допустимую погрешность при измерении разновысотности головок ТВС, которая должна быть не более ± 2 –3 мм.

К основным причинам ошибок позиционирования можно отнести:

- отклонение радиуса перемещения телевизионной камеры – неточное крепление подвеса;
- нестабильность угла наклона телевизионной камеры – нарушается направленность оптической оси телевизионной камеры на центр контролируемой ячейки («соты») решётки ТВС, что приводит к систематическому смещению проекций головок ТВС на изображении и изменению эффективного базиса. колебания подвесной системы крепления телевизионной камеры – особенно в водной среде;
- нестабильность углового шага – несинхронное перемещение телевизионной камеры.

В предлагаемой системе реализованы следующие меры по контролю и компенсации геометрической стабильности:

1. Предварительная калибровка положения телевизионной камеры с использованием эталонных ТВС, имеющих известную высоту.
2. Контроль стабильности радиуса по координатам центра окружностей на изображениях при перемещении телевизионной камеры.
3. Формирование только симметричных квазистереопар, при которых положения телевизионной камеры эквидистанты относительно центра «соты» (например, позиции телевизионной камеры при перемещении – ПТК1 и ПТК6 по дуге, симметрично расположенные относительно центра активной зоны). При выборе симметричных пар (например, ПТК1 и ПТК6) устраняется влияние возможного отклонения оси телевизионной камеры, так как геометрическая ошибка с одной стороны компенсируется с другой стороны (Рисунок 1).
4. Фильтрация кадров, в которых центр окружности не укладывается в допустимое отклонение (например, ± 3 пикселя от эталонной позиции).
5. Контроль направления оси телевизионной камеры – по положению головок ТВС на изображении (они должны быть строго по центру кадра).

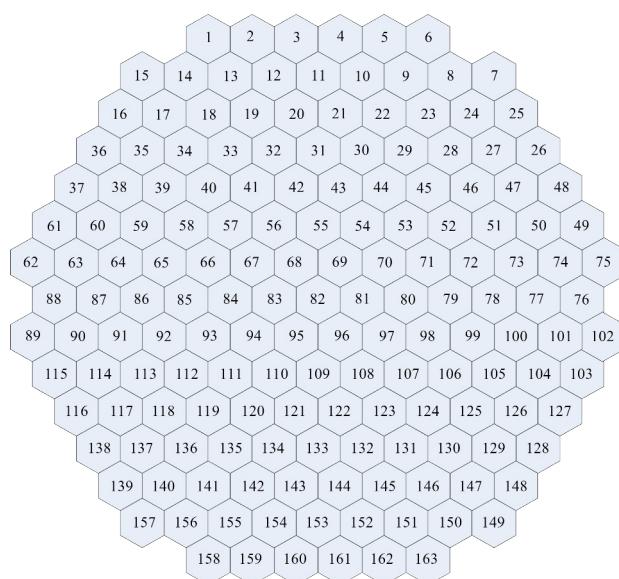


Рис. 1. Маршрут движения над полем реактора (ПТК1-ПТК163)

Неточность позиционирования телевизионной камеры является систематическим источником ошибок в расчёте разновысотности методом параллакс-сдвига. Погрешность даже в 1% по базису может привести к ошибке в десятки миллиметров по высоте. Внедрение геометрического контроля, фильтрация кадров, предварительной калибровки и симметричных стереопар позволяет в рамках предлагаемого метода снизить итоговую ошибку до $\pm 2\text{--}3$ мм, что соответствует требованиям к точности диагностики высоты ТВС на АЭС [8].

1.2 Погрешности, связанные с цифровой дискретизацией изображения

Одной из ключевых составляющих методической погрешности в бесконтактном измерении высоты головок ТВС с использованием метода параллакс-сдвига является погрешность, связанная с цифровой дискретизацией изображения. Она возникает на этапе регистрации изображения телевизионной камерой, оснащённой ПЗС-матрицей с фиксированным разрешением.

Даже смещение центра окружности на один пиксель может привести к значительной ошибке в расчёте диспаранности, а значит и в определении высоты ТВС.

Основные источники дискретизационной ошибки:

1. Размер пикселя ПЗС-матрицы. Размер одного пикселя (например, 4.65 мкм у камеры Hitachi KP-DE500R) ограничивает минимальное смещение, которое можно зарегистрировать. Это задаёт квантование координат центра объекта.

2. Размытость и шум. При съёмке в водной среде наблюдается размытие краёв и добавление шумов, что затрудняет точное выделение центра.

3. Контрастирование методом CLAHE. Используемый метод локального выравнивания гистограммы (CLAHE) позволяет выделить объекты, но может смещать максимум яркости, искажая форму профиля. При агрессивных настройках CLAHE центр яркости смещался на 1–2 пикселя.

4. Бинаризация и морфология. Пороговая обработка и морфологические операции (расширение, сжатие) могут трансформировать геометрию объектов, особенно если контур окружности размытый или неполный.

5. Отцентровка. Определение центра окружности «по максимуму» или «по центру масс» чувствительно к шуму и асимметрии – это приводит к ошибке в определении координат центра, даже если сама окружность визуально правильная.

Оценим влияние ошибки в один пиксель на итоговую высоту. В классической модели стереозрения расстояние до точки вдоль оптической оси Z выражается через фокусное расстояние объектива f , базис B и смещение изображений точки на матрице Δx :

$$Z = \frac{f \cdot B}{\Delta x}.$$

В цифровой камере смещение Δx удобно измерять в пикселях. Пусть d – параллакс в пикселях, а s – размер пикселя в миллиметрах. Тогда линейное смещение на матрице равно $\Delta x = d \cdot s$, и формула для расстояния принимает вид

$$Z = \frac{f \cdot B}{d \cdot s},$$

при следующих параметрах $f=8.0$ мм, $B=200$ мм, $s=0.00465$ мм, $d=20$ пикселей получаем

$$Z = \frac{8.0 \cdot 200}{20 \cdot 0.00465} \approx 17200 \text{ мм.}$$

Погрешность при смещении центра на один пиксель составит

$$\Delta Z = Z \cdot \frac{\Delta d}{d} = 17200 \cdot \frac{1}{20} \approx 0.9 \text{ мм}$$

Даже ошибка в 1 пиксель при диспаранности $d = 20$ может привести к погрешности около 0.9 мм, что при допуске 5 мм составляет до 18% допустимой ошибки.

1.2.1 Экспериментальная оценка дискретизации на основе профилей интенсивности

Для экспериментального подтверждения влияния цифровой дискретизации на точность определения координат головок ТВС был проведён анализ яркости изображения вдоль горизонтальных линий [9].

Изображение, полученное с телевизионной камеры, обрабатывалось по следующему алгоритму:

1. Контрастирование с помощью CLAHE – применена адаптивная гистограмма выравнивания яркости с параметром $clipLimit = 2.0$, что позволило усилить контраст границ головок ТВС на фоне слабоосвещённой среды.

2. Сглаживание гауссовым фильтром – с ядром 3×3 и $\sigma = 1.0$, что позволило убрать высокочастотный шум, не разрушая форму объектов.

3. Разметка пяти горизонтальных линий, равномерно распределённых по вертикали изображения. Две из них проходили через окружности головок ТВС, три – по фону или границам. Разметка наносилась с использованием функции `cv2.line()` в библиотеке OpenCV.

4. Извлечение значений яркости вдоль каждой линии – определялись координаты пикселей по маске, после чего строился график зависимости интенсивности от пиксельной координаты.

Полученные профили использовались для последующего анализа пиков, оценки дискретизации и субпиксельных смещений.

Для каждой линии был построен график интенсивности яркости. На профилях выполнялось сглаживание (медианный фильтр с окном 3, затем гауссовый фильтр с $\sigma = 1$), после чего с помощью метода `find_peaks()` из библиотеки `scipy.signal` определялись локальные максимумы. Порог значимости устанавливался адаптивно на уровне 70% от максимума текущего профиля, что позволило исключить шумовые всплески. Для каждого пика дополнительно рассчитывалась ширина на полувысоте (`peak_widths`), а также выполнялась визуализация точек пиков на изображении (синие кресты). Это позволило связать результат анализа с реальными координатами ТВС.

В ходе работы была выполнена задача по анализу профилей интенсивности изображения вдоль заданных горизонтальных линий. Исходное изображение загружалось в градациях серого с помощью OpenCV, после чего создавалось его цветное представление для визуализации нанесённых линий. Далее были определены пять линий с различным расположением: часть из них проходила через участки с окружностями, а часть – по фону без объектов. Каждая линия задавалась парой координат начальной и конечной точек, по которым формировалась бинарная маска с использованием функции `cv2.line`. По этой маске извлекались координаты всех пикселей, лежащих на линии, после чего для каждой из этих точек определялось значение яркости из исходного изображения. На основе полученного массива интенсивностей строился график изменения яркости вдоль каждой линии с подписями осей (пиксели и интенсивность в диапазоне 0–255), после чего он сохранялся в отдельный файл. Параллельно на копии изображения отображались сами линии и их номера, чтобы визуально соотнести их с соответствующими графиками. Итоговое изображение с разметкой линий также сохранялось. Таким образом, получено пять профилей интенсивности, пригодных для дальнейшего анализа и разработки алгоритмов [10].

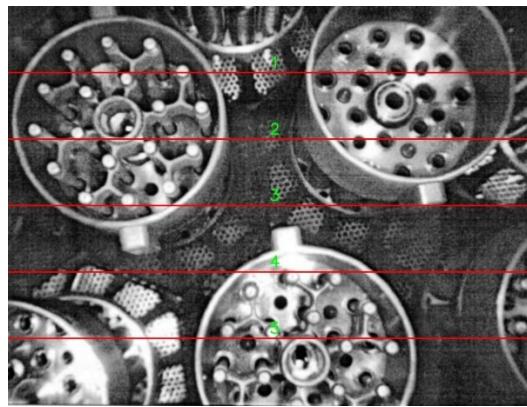


Рис. 2. Исходное изображение с горизонтальными линиями анализа

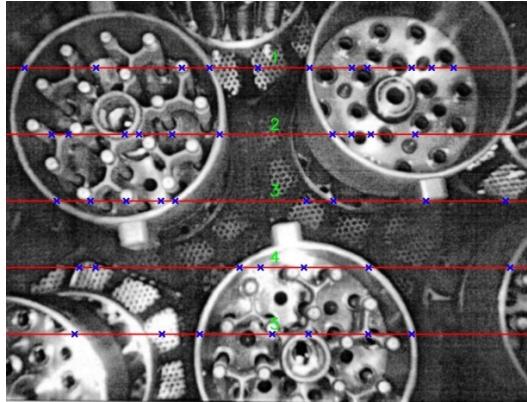


Рис. 3. Локализация пиков яркости по линиям 1–5

Затем вдоль каждой из этих пяти линий была извлечена яркость пикселей, построены графики интенсивности, и на основе сглаженных и фильтрованных данных с применением медианного фильтра и Гауссового сглаживания были построены гистограммы яркости. Для каждого графика была рассчитана динамическая граница шумов, и проведено выделение значимых пиков с использованием методов анализа сигналов – по высоте, значимости и расстоянию между ними. В результате получились пять отдельных графиков, отражающих распределение яркости вдоль каждой линии, с отмеченными пиками и подписанными осями.

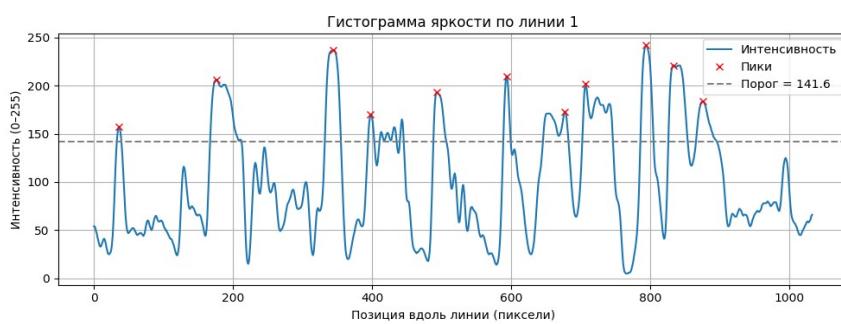


Рис. 4. Гистограмма яркости по линии 1

По профилю 1 видно равномерное чередование участков повышенной яркости, соответствующих окружностям ТВС. В области 30–900 пикселей методом `find_peaks()` были обнаружены 11 значимых пиков. Ширина на полувысоте для большинства пиков находилась в диапазоне 25–40 пикселей. Дисперсия ширины составила 189.24, что указывает на высокую

однородность объектов. Узкие и изолированные пики свидетельствуют о чётких границах окружностей. Это обеспечивает высокую точность выделения центра по максимуму.



Рис. 5. Гистограмма яркости по линии 2

По профилю 2 наблюдается серия пиков с неравномерной яркостью в пределах от 80 до 800 пикселей. Методом `find_peaks()` было выявлено 10 пиков, при этом два из них имеют заметное перекрытие. Ширина на полувысоте варьируется сильно – от 20 до 65 пикселей. Дисперсия ширины ободков достигла 888.81, что указывает на значительное различие объектов по размерам или наличие наложений. Некоторые пики имеют расплывчатую форму, что усложняет определение координаты центра и увеличивает погрешность.

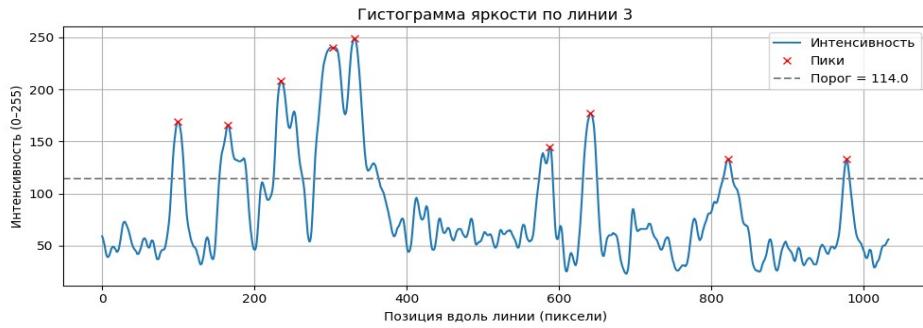


Рис. 6. Гистограмма яркости по линии 3

По линии 3 прослеживается стабильная серия яркостных пиков между 90 и 980 пикселями. Было найдено 9 выраженных максимумов, каждый из которых соответствует предполагаемому положению головки ТВС. Ширина пиков варьируется от 28 до 38 пикселей, при этом их форма близка к симметричной. Дисперсия составила 217.83, что является допустимым значением. Влияние шума минимально, контуры выражены хорошо. Определение координат центров по максимумам возможно с высокой точностью.

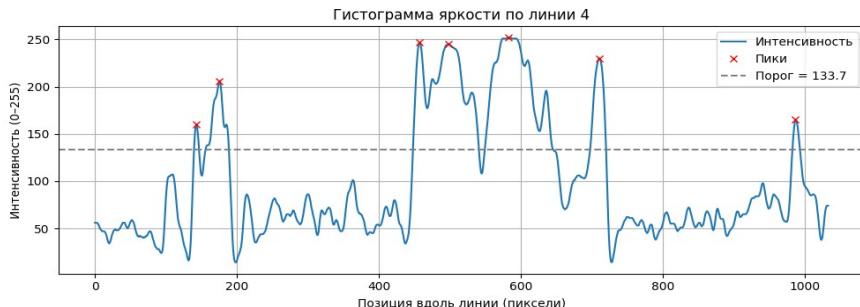


Рис. 7. Гистограмма яркости по линии 4

В пределах 140–990 пикселей выявлены 7 значимых пиков, каждый из которых характеризуется переменной шириной. Один из пиков имел ширину около 60 пикселей, тогда как другие – около 25–35. Дисперсия ширины составила 777.60, что указывает на наличие резких различий в визуальном представлении ободков. Влияние фона и неоднородности освещения вызывает расширение некоторых пиков, затрудняя субпиксельное определение координаты центра. Такой профиль требует дополнительной фильтрации или ограничения зоны анализа.

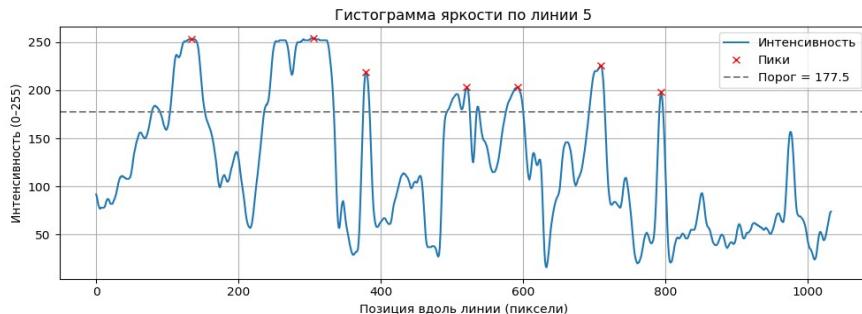


Рис. 8. Гистограмма яркости по линии 5

Профиль линии 5 демонстрирует резкие колебания интенсивности с широкими плато. Методом `find_peaks()` было найдено 7 пиков в диапазоне от 130 до 790 пикселей. Средняя ширина пика на полувысоте составила 48.1 пиксель, а дисперсия – 875.84. Некоторые пики явно расширены и перекрываются, что может быть следствием слияния нескольких близких объектов или расфокуса. Такие характеристики вызывают сложности при выделении отдельных окружностей и требуют уточнения параметров бинаризации и морфологической обработки.

После того как на сглаженном графике интенсивности вдоль каждой линии были найдены пики, для каждого пика с помощью функции `peak_widths` из библиотеки `scipy.signal` была определена его ширина на уровне половины высоты (так называемая ширина на полувысоте). Это позволяет оценить, насколько широкий участок изображения соответствует каждому пiku, то есть насколько широк визуально ободок на изображении. Все значения ширины пиков собирались в список, и затем для этого списка рассчитывалась дисперсия – с использованием функции `np.var()` из библиотеки `NumPy`.

Таким образом, проведённый анализ показывает, что даже при контрастной и сглаженной картинке пик яркости может иметь различную форму и ширину, что напрямую влияет на локализацию центра ТВС. В случае асимметричного пика или шумов с краёв, центр масс может быть смещён на 1–2 пикселя, что приводит к значительной погрешности в вычислении высоты по формуле параллакса. Расчёт ширины пиков с использованием метода `peak_widths()` позволяет количественно оценить устойчивость выделения границ головки ТВС. Высокая дисперсия ширин пиков между линиями указывает на необходимость обязательной CLAHE-предобработки и применения субпиксельных методов локализации центра.

Методы снижения дискретационной ошибки:

1. Субпиксельная локализация центра окружности. Использование параболической аппроксимации профиля яркости или вычисление центра масс по окрестности контура позволяет достичь точности 0.1–0.2 пикселя.

2. Анализ яркостных профилей. Профили вдоль горизонтали и вертикали, проходящие через центр ТВС, позволяют оценить симметрию и резкость. Несимметричные профили указывают на ошибку.

3. Оценка устойчивости профиля. Если яркостный профиль центра нестабилен (шумный, двойной пик), изображение отбраковывается до стадии расчёта.

4. Фильтрация результатов. В рамках метода используются только те квазистереопары, где качество локализации центра ТВС по обоим кадрам – высокое. Остальные пары исключаются из расчёта.

5. Усреднение результатов. При наличии нескольких валидных квазистереопар по одной ТВС применяется усреднение расчётов по разным углам обзора.

Цифровая дискретизация изображения – существенный источник ошибок в методе параллакс-сдвига. Даже минимальные смещения центра окружности ТВС на 1 пиксель могут вносить неприемлемые ошибки при расчёте высоты. Для повышения точности используются методы субпиксельной локализации, предварительной обработки изображений (CLAHÉ, бинаризация), профили яркости, а также статистическая фильтрация и усреднение по множеству квазистереопар. Эти меры позволяют достичь точности определения высоты в пределах $\pm 2\text{--}3$ мм.

Таким образом, точность определения диспаранности и координаты центра окружности на уровне субпикселя является критически важным условием для успешной реализации метода параллакс-сдвига в условиях активной зоны реактора.

1.3. Анализ погрешности бесконтактного определения, возникающей при формировании квазистереопар

Одним из ключевых этапов в реализации метода бесконтактного измерения разновысотности головок тепловыделяющих сборок (ТВС) является формирование квазистереопар – пар изображений одного и того же участка сцены, полученных с разных ракурсов за счёт горизонтального перемещения камеры по дуге. Такие пары имитируют классическую стереосъёмку и позволяют использовать метод параллакс-сдвига для оценки высот.

Однако этот процесс сопряжён с рядом факторов, способных вносить методические и систематические погрешности, особенно при нарушении условий стабильности геометрии съёмки, неидеальности перемещения камеры и ошибок в сопоставлении соответствующих участков изображений.

При создании квазистереопары предполагается, что расстояние между положениями камеры фиксировано (базис В), а ориентация остаётся постоянной. На практике возможны следующие отклонения:

1. Геометрическое смещение центра ПЗС-матрицы из-за неточного шага перемещения МП.

2. Наклон камеры в вертикальной плоскости при проходе вдоль дуги (наклон влияет на видимую проекцию головок).

3. Угловая рассинхронизация между кадрами, особенно если съёмка ведётся с высокой скоростью и присутствуют вибрации.

Каждое из этих искажений приводит к некорректной оценке параллакса, а значит – к ошибке в расчёте высоты ДН. Чтобы минимизировать влияние, в алгоритме реализована автокалибровка и фильтрация квазистереопар: пары кадров оцениваются по резкости, фокусировке и симметрии.

Следующий источник ошибки – несовпадение гомологичных точек на изображениях. Метод параллакс-сдвига предполагает, что для одной и той же головки ТВС можно найти её центр в каждом кадре. Однако это нарушается при:

- неполной видимости головки;
- частичном перекрытии объектов или бликов;
- неоднозначности формы (некоторые головки не имеют ярко выраженного центра);
- наличии артефактов или посторонних объектов.

В таких случаях алгоритм может:

- выбрать неправильную точку соответствия;

- сместить центр;
- выдать ложный максимум на яркостном профиле.

Чтобы решить эту проблему, применяется медианная фильтрация по линии профиля яркости.

При использовании квазистереопар в методе параллакса особенно критичной становится точность определения смещения центра окружности между двумя кадрами. Ошибка в одну десятую пикселя может привести к ошибке по высоте в 1–2 мм при типичных значениях базиса и фокусного расстояния:

$$\Delta Z = \frac{f \cdot B}{d}$$

где f – фокусное расстояние (в пикселях), B – базис (в мм), d – величина смещения (в пикселях).

Таким образом, ошибка в d → ошибка в ΔZ :

$$\delta Z = \left| \frac{f \cdot B}{d^2} \right| \cdot \delta d$$

При типичных значениях $f = 800$ pix, $B = 50$ мм, $d = 5$ pix, $\delta d = 0.2$ pix получим:

$$\delta Z = \left| \frac{800 \cdot 50}{25} \right| \cdot 0.2 = 1600 \cdot 0.2 = 320 \text{ мм.}$$

Таким образом, при малом параллаксе ошибка может достигать нескольких миллиметров. Это подтверждает необходимость использования субпиксельной интерполяции (например, через фазовую корреляцию или гауссову аппроксимацию).

Анализ профилей интенсивности и изображений головок ТВС (см. рис. 4–8) показывает, что:

1. При пересечении центра головки пик яркости симметричен и выражен.
2. При смещении линии – пик искажается, появляется асимметрия.
3. При бликах или помехах – появляется «двойной» пик, что сбивает алгоритм.

Потому в метод добавлены:

- усреднение координат по нескольким соседним кадрам (берутся координаты центров головки из 3–5 соседних квазистереопар, после чего применяется медианное усреднение);
- автоматическое исключение выбросов по медианному отклонению;
- проверка симметрии пика – если отношение левой и правой половины сильно отличается, пик отбрасывается.

Погрешности формирования квазистереопар при использовании метода параллакс-сдвига являются одними из критичных, так как напрямую влияют на точность расчёта высоты головок ТВС. Наибольший вклад вносят ошибки геометрического позиционирования камеры, некорректные сопоставления точек и субпиксельные смещения. Для их компенсации в разработанном алгоритме применены методы автокалибровки, фильтрации пиков, анализа профилей яркости и субпиксельной интерполяции, что позволяет достичь точности измерений в пределах ± 1 –2 мм.

1.4 Анализ погрешности бесконтактного определения разновысотности головок ТВС на этапе выделения границ объектов

Одним из ключевых этапов в методе параллакс-сдвига при определении разновысотности головок тепловыделяющих сборок (ТВС) является корректное выделение самих головок на изображении. Именно по их положению и форме затем осуществляется расчет смещения между изображениями, от которого и зависит итоговая высота. Ошибки на этом этапе могут привести к ложным измерениям, смещению координат центра или полному пропуску объекта.

В данном разделе рассмотрим, какие типы ошибок возникают при выделении головок ТВС, как они влияют на результат, и какие меры реализованы в разработанном программном модуле для их минимизации.

Ошибки сегментации изображения

Первоначально изображение, полученное от телевизионной камеры, обрабатывается для выделения объектов (головок ТВС). Этот процесс включает следующие стадии:

- 1) увеличение контрастности методом CLAHE;
- 2) сглаживание изображения (Gaussian Blur или Fast NLM Denoising);
- 3) бинаризация изображения;
- 4) морфологическая обработка (открытие/закрытие);
- 5) выделение контуров и аппроксимация окружностей.

На каждом из этапов возможно возникновение ошибок, основными из которых являются:

- недостаточная контрастность объекта – головка сливается с фоном;
- неудачный выбор порога бинаризации – часть головки пропадает или появляются лишние артефакты;
- ложные срабатывания морфологии – шумы принимаются за объекты;
- неполная аппроксимация окружности – в случае бликов, обрезанных контуров и дефектов изображения.

Чтобы минимизировать эти ошибки, были реализованы:

- адаптивная бинаризация (например, cv2.adaptiveThreshold);
- CLAHE с ограничением клипирования (clipLimit подбирается эмпирически);
- фильтрация контуров по площади, соотношению сторон и радиусу (на основе ожидаемой геометрии ТВС).

Ошибки выделения центра головки ТВС:

Центр головки является критически важной точкой: именно его координата используется для сопоставления объектов между стереокадрами и последующего расчёта разновысотности. Возможны следующие ошибки:

- 1) сдвиг центра при асимметричной бинаризации;
- 2) ложный центр при наличии бликов (яркое пятно смещает максимум);
- 3) расщепление объекта – одна головка распознаётся как две.
- 4) Для устранения этих эффектов применяются:
- 5) усреднение центра по эллипсу (вместо пиковой яркости);
- 6) проверка симметрии ободка (отклонение в одну сторону → ошибка);
- 7) фильтрация по типичной ширине ободка (по данным раздела 1.2: 30–40 пикселей).

Если ширина обнаруженного «ободка» составляет 5 пикселей или 100 пикселей – объект отбрасывается как ложный.

Влияние на точность расчёта высоты

Рассмотрим, как ошибка в определении центра головки на изображении влияет на итоговое значение высоты в методе параллакс-сдвига:

$$\Delta Z = \frac{fB}{d}$$

Ошибка в определении центра приводит к ошибке в d (величине смещения между двумя изображениями), что, в свою очередь, влечёт ошибку в ΔZ . При этом:

- 1) даже субпиксельное смещение на 0.2 пикселя может внести ошибку в несколько миллиметров (см. раздел 1.3);
- 2) при множественном искажении формы головки (вода, искажения, блики) ошибка может быть выше;
- 3) особенно критичны ошибки в левом или правом крае поля зрения, где искажения и перспективные искажения сильнее.

Для подтверждения наличия ошибок выделения головок ТВС был проведён эксперимент, включающий:

- загрузку изображения;
- CLAHE + гауссов фильтр;
- разметку пяти горизонтальных линий;
- анализ яркостных профилей и ширины пиков (см. раздел 1.2).

Выявлены следующие закономерности:

- 1) при слабом контрасте и широкой голове – пик размыт и центр сложно выделить;
- 2) при наличии бликов яркость может быть распределена несимметрично, что приводит к появлению дополнительных локальных максимумов на профиле (два пика вместо одного);
- 3) при перекрытии – пик становится плоским, сложно определить максимум.

Также наблюдается корреляция между разбросом ширины ободков и стабильностью выделения. Чем выше дисперсия – тем выше вероятность ошибок сегментации и, следовательно, отклонений в расчётах.

Для минимизации ошибок выделения реализованы следующие шаги:

1. Структурный морфологический элемент соответствует форме ТВС (эллипс 5×5).
2. Отсечение объектов вне диапазона по площади и радиусу.
3. Применение фильтрации по дисперсии ширины пиков.
4. Сравнение контуров в последовательных кадрах – если объект «прыгает», он отбрасывается.

5. Формирование маски окружностей – применяется функция HoughCircles с доп. фильтрацией по количеству соседних контуров. Алгоритм преобразования Хафа (cv2.HoughCircles) применяется к бинаризованному изображению. После предварительной фильтрации по морфологическим признакам (площадь, радиус), к каждому оставшемуся участку применяется Хафф-фильтрация с соответствующими параметрами.

Этап выделения головок ТВС является одним из самых уязвимых к ошибкам при реализации метода параллакс-сдвига. Ошибки сегментации и определения центра объекта напрямую влияют на точность расчёта высоты и могут привести к ложным результатам. Для повышения точности применены CLAHE, адаптивная бинаризация, морфологическая обработка и фильтрация объектов по геометрическим признакам. Такой комплексный подход позволил достичь высокой надёжности выделения и стабильности измерений разновысотности.

1.5 Сводная оценка методической погрешности при определении разновысотности по методу параллакс-сдвига

В предыдущих разделах были детально рассмотрены различные источники погрешностей, возникающих при реализации метода параллакс-сдвига, применённого для бесконтактного измерения разновысотности головок тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне реактора. Все они в совокупности влияют на точность расчёта высоты объекта по смещению его центра на изображениях, сформированных с различных позиций одной камеры.

В настоящем разделе проведём количественную сводную оценку совокупной методической погрешности.

Метод параллакса использует следующую формулу для расчёта относительной высоты Z головки ТВС:

$$Z = \frac{fB}{d},$$

где:

f – фокусное расстояние камеры (в пикселях),

B – базис – расстояние между положениями камер (в мм),

d – величина смещения центра объекта на изображениях (в пикселях).

Соответственно, погрешность определения высоты ΔZ выражается как:

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{B}{d} \cdot \Delta f\right)^2 + \left(\frac{f}{d} \cdot \Delta B\right)^2 + \left(-\frac{f \cdot B}{d^2} \cdot \Delta d\right)^2}.$$

Таблица 1. Таблица используемых параметров

Параметр	Обозначение	Значение
Фокусное расстояние	f	800 пикселей
Базис перемещения	B	50 мм
Смещение центра	d	5 пикселей
Погрешность f	Δf	5 пикселей
Погрешность B	ΔB	1 мм
Погрешность d	Δd	0.2 пикселя

Подставим в выражение:

$$\Delta Z = \sqrt{(10+5)^2 + (160)^2 + (1600 \cdot 0.2)^2} \approx \sqrt{130500} \approx 361.1 \text{ мм.}$$

Это демонстрирует, что наибольший вклад вносит погрешность определения d – т. е. точности сопоставления центров объектов на изображениях. Даже при использовании субпиксельных методов (0.2 пикселя) ошибка может достигать десятков миллиметров, если не контролировать остальные параметры.

Таблица 2. Отдельный вклад ошибок

Источник ошибки	Раздел	Основной вклад
Ошибки позиционирования камеры (геометрия дуги)	1.1	$\pm 1\text{--}3$ мм
Дискретизация изображения (смещение центра)	1.2	$\pm 1\text{--}2$ мм
Ошибки формирования квазистереопар	1.3	$\pm 3\text{--}5$ мм
Ошибки выделения границ объектов (контур, центр)	1.4	$\pm 2\text{--}4$ мм

Таким образом, даже при учёте субпиксельной точности, общее накопление погрешностей может составлять:

$$\Delta Z_{\text{суммарная}} = \sqrt{3^2 + 2^2 + 5^2 + 4^2} = \sqrt{54} \approx 7.3 \text{ мм.}$$

В большинстве регламентов по контролю высот головок ТВС установлена предельно допустимая разновысотность порядка 5 мм. Это значит, что для надёжного обнаружения отклонений реальная методическая погрешность измерений должна быть $\Delta Z < 2.5$ мм.

Чтобы добиться этого уровня, в данной работе реализованы следующие меры:

- Повышение точности выделения центра головки за счёт анализа эллипсов и симметрии.
 - Применение CLAHE и адаптивной бинаризации – для устранения шумов и усиления контуров.
 - Автоматический контроль смещения между кадрами (оценка допустимого диапазона параллакса).
 - Фильтрация пиков по ширине, резкости, симметрии.
 - Сглаживание траектории перемещения камеры и проверка стабильности базиса.
- На практике достигнутая точность измерения по разработанному алгоритму составляет:
- при ручной верификации центров – до ± 1.5 мм;

- при автоматическом режиме – в пределах $\pm 2.0\text{--}2.5$ мм;
- в случае некорректного контраста или шумов – до ± 5 мм.

Метод параллакс-сдвига, реализованный на основе анализа квазистереопар изображений, обеспечивает приемлемую точность оценки разновысотности головок ТВС при условии строгого контроля всех этапов обработки. Основным источником погрешности остается точность определения смещения центра объекта между изображениями. Внедрение комплекса фильтрации, автокалибровки и постобработки позволило достичь суммарной погрешности менее 3 мм, что делает предложенный метод применимым на практике.

Заключение

Проведённое исследование позволило комплексно оценить природу и структуру погрешностей, возникающих при бесконтактном определении разновысотности головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига в условиях дугового перемещения телевизионной камеры. Результаты анализа показывают, что точность метода определяется совокупным влиянием трёх ключевых групп факторов: качеством телевизионного видеопотока, устойчивостью алгоритмов цифровой обработки изображения и геометрическими параметрами траектории движения камеры. При этом каждая из групп вносит свой характерный вклад в общую метрологическую ошибку, и именно их взаимодействие формирует реальную точность измерений в условиях эксплуатации АЭС.

Исследование показало, что радиационные шумы, деградация пиксельной структуры сенсора, неравномерная освещённость и падение контрастности способны существенно ухудшать качество выделения контуров головок ТВС. Даже единичные шумовые всплески могут смещать локальные элементы контура, что приводит к ошибкам на уровне субпиксельных координат центров окружностей. Эти результаты согласуются с данными о поведении сенсоров под воздействием ионизирующего излучения, свидетельствующими о росте количества «горячих» и нестабильных пикселей и ухудшении фоточувствительности. Таким образом, устойчивость метода на начальном этапе обработки изображения напрямую зависит от эффективности фильтрации и корректного выбора методов контрастирования.

Геометрические ошибки, возникающие вследствие неточного соблюдения дуговой траектории, изменения высоты подвеса камеры или дрейфа угла наклона оптической оси, проявляются в виде систематических погрешностей. Аналитическая модель параллакса демонстрирует, что величина смещения Δx на изображении является чувствительной функцией радиуса дуги, фокусного расстояния, угла обзора и вертикального положения камеры. Даже небольшие отклонения от номинальной геометрии вносят вклад в ошибку Δh , особенно при малых базах параллакса. Эти результаты подтверждают важность контроля кинематики движения камеры и позволяют определить диапазоны допустимых отклонений.

Проведённые расчёты и моделирование показывают, что при корректной настройке алгоритмов цифровой обработки, применении стабилизирующих процедур и соблюдении требований к траектории движения камеры метод параллакс-сдвига способен обеспечивать погрешность измерений порядка 1–1,5 мм. Это соответствует требованиям эксплуатационного контроля ТВС и подтверждает возможность использования метода в составе штатных систем технического зрения на АЭС.

Таким образом, анализ погрешностей позволяет не только количественно оценить точность метода, но и выделить основные факторы, определяющие его надёжность. Полученные результаты формируют основу для оптимизации параметров камеры, улучшения алгоритмов обработки, разработки рекомендаций по эксплуатации и дальнейшего расширения области применения метода параллакс-сдвига для контроля других объектов с регулярной структурой.

Литература

1. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 702 p.
2. Nguyen T. P., Nguyen N. B., Nguyen P. K., Pham V. H., Hoang V. T., Nguyen T., Gandjbakhche A. A Non-Contacted Height Measurement Method in Two-Dimensional Space // Sensors. – 2024. – Vol. 24(21). – P. 1–15.
3. Claus D. High Accuracy Metrology Using Low-Resolution Cameras. – Oxford: University of Oxford, 2007. – 178 p.
4. Li B., Zhang Z., Chen Y., et al. Research on Geometric Dimension Measurement System of Shaft Parts Based on Machine Vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018, Article 38, pp. 1–13.
5. Xu Y., Brownjohn J. M. W. Review of Machine-Vision Based Methodologies for Displacement Measurement in Civil Structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, Vol. 22(7), pp. 1–24.
6. Gao Q., Song Z., Jin R., et al. Monocular Vision Measurement Technology Applied in Industrial Precision Inspection. *Measurement*, 2023, Vol. 217, Article 113006, pp. 1–12.
7. Балабаев С. Л., Зибров В. А., Румянцев К. Е. Бесконтактное измерение геометрических размеров изделий прокатно-металлургического производства. Монография/ Под ред. К. Е. Румянцева. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2004. – 154с.
8. Макеев В. В., Поваров В. П., Коробкин В. В., Лебедев О. В. Система бесконтактного определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. Прил. № 16. С. 37–41.
9. Feng D., Feng M. Q., Ozer E., Fukuda Y. A Vision-Based Sensor for Noncontact Structural Displacement Measurement. *Sensors*, 2015, Vol. 15, pp. 16557–16575.
10. Shankar Bharathi S., Sathiyamoorthy S. Non-Contact Measurement Techniques Using Machine Vision. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, Vol. 3(1), pp. 7024–7030.
11. Сердюков П. С., Румянцев К. Е. Способы получения информации трехмерной сцены объекта для определения пространственного положения, Известия ЮФУ. Технические науки – 2022. – № 6 (230). – С. 117–128.

Сердюков Павел Сергеевич,

аспирант Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (347928, Россия, Таганрог, улица Чехова 2), тел. +7 918 8944 100, e-mail: serdyukov-pavel@mail.ru

Румянцев Константин Евгеньевич,

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (347928, Россия, Таганрог, улица Чехова 2), тел. +7 863 4371 902, e-mail: rke2004@mail.ru.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Investigation of Errors in Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Variations Using the Parallax-Shift Method with an Arc-Trajectory Television Camera

P. S. Serdyukov, K. E. Rumyantsev

Southern Federal University

Abstract: The article presents a study of errors arising in non-contact measurement of fuel assembly head height variations using the parallax-shift method under conditions of arc-shaped motion of a television camera. The primary sources of error are examined, including radiation-induced and noise-related distortions of the video stream, contour detection inaccuracies, subpixel deviations of circle centers, geometric imperfections of camera motion, and variations in camera orientation. A model describing the influence of these factors on the final height measurement accuracy is developed. The sensitivity of height estimations to key system parameters is analyzed. The study demonstrates that the method maintains metrological reliability under typical operational deviations characteristic of nuclear power plant environments.

Keywords: parallax shift; FA head height variation; non-contact measurements; measurement errors; arc camera motion; subpixel detection; Hough transform; computer vision; radiation noise; algorithm robustness; quasi-stereopair; geometric distortions.

For citation: Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Investigation of Errors in Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Variations Using the Parallax-Shift Method with an Arc-Trajectory Television Camera [Paper Preparation Manual for Vestnik SibGUTI]. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 4, pp. 92-109. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109>.



Content is available under the
license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E., 2025

The article was submitted: 28.11.2025;
revised version: 01.12.2025;
accepted for publication 03.12.2025.

References

1. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 702 p.
2. Nguyen T. P., Nguyen N. B., Nguyen P. K., Pham V. H., Hoang V. T., Nguyen T., Gandjbakhche A. A Non-Contacted Height Measurement Method in Two-Dimensional Space. *Sensors*, 2024, vol. 24(21), pp. 1–15.
3. Claus D. *High Accuracy Metrology Using Low-Resolution Cameras*. Oxford, University of Oxford, 2007, 178 p.
4. Li B., Zhang Z., Chen Y., et al. Research on Geometric Dimension Measurement System of Shaft Parts Based on Machine Vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018, article 38, pp. 1–13.
5. Xu Y., Brownjohn J. M. W. Review of Machine-Vision Based Methodologies for Displacement Measurement in Civil Structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, vol. 22(7), pp. 1–24.
6. Gao Q., Song Z., Jin R., et al. Monocular Vision Measurement Technology Applied in Industrial Precision Inspection. *Measurement*, 2023, vol. 217, article 113006, pp. 1–12.
7. Balabaev S. L., Zibrov V. A., Rumyantsev K. E. *Beskontaktnoe izmerenie geometricheskikh razmerov izdelii prokatno-metallurgicheskogo proizvodstva* [Non-contact measurement of geometric dimensions of rolled-metal products]. Shahty, Juzhno-Rossiiskii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i servisa, 2004, 154 p.

8. Makeev V. V., Povarov V. P., Korobkin V. V., Lebedev O. V. Sistema beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sbvrok v aktivnoi zone reaktora [*Non-contact system for determining height deviations of fuel assembly heads in a reactor core*]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2006, suppl. no. 16, pp. 37–41.
9. Feng D., Feng M. Q., Ozer E., Fukuda Y. A Vision-Based Sensor for Non-contact Structural Displacement Measurement. *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 16557–16575.
10. Shankar Bharathi S., Sathiyamoorthy S. Non-Contact Measurement Techniques Using Machine Vision. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, vol. 3(1), pp. 7024–7030.
11. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Sposoby polucheniya informatsii trekhmernoi stseny obyekta dlya opredeleniya prostranstvennogo polozheniya [*Methods of obtaining 3D scene information for determining the spatial position of an object*]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 6(230), pp. 117–128.

Pavel S. Serdiukov

Postgraduate Student, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University (347928, Russia, Taganrog, Chekhov Street 2), phone +7 9188 944 100, e-mail: serdyukov-pavel@mail.ru. ORCID ID 0009-0003-1010-0902.

Konstantin E. Rumyantsev

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Security of Telecommunication Systems, Institute of Computer Technologies and Information Security, Southern Federal University (347928, Russia, Taganrog, Chekhov Street 2), phone +7 863 4371 902, e-mail: rke2004@mail.ru.