



DOI:

Системы компьютерного зрения.

Оптические основы компьютерного зрения: формирование изображения, методы калибровки и коррекции искажений

В. Ю. Прозоров, Ю. А. Евстифеев, Ю. В. Рубцов,
«ЦКБ «Дейтон», Москва, Зеленоград, Россия

Статья открывает цикл публикаций, посвященный оптическим основам компьютерного зрения. Рассматриваются математические модели формирования изображения: камера-обскура, пинхолевая модель и уравнение тонкой линзы. Подробно анализируются геометрические искажения (радиальная и тангенциальная дисторсия) и методы их коррекции с использованием полиномиальных моделей и гомографических преобразований. Приведены формальные постановки задач калибровки камеры и минимизации репроекционной ошибки. Исследованы фотометрические аспекты: модели освещенности, ретинекс-компенсация, гистограммная эквализация. Рассмотрены методы подавления шумов (гауссова фильтрация, билатеральная фильтрация, нелокальное среднее). Отдельное внимание уделено практическим вопросам повышения метрологической точности (субпиксельная локализация, температурная компенсация, многокадровое усреднение).

Ключевые слова: компьютерное зрение, оптическая калибровка, пинхолевая модель, дисторсия, гомография, метод Чжана, репроекционная ошибка, фотометрия, ретинекс, подавление шумов, субпиксельная локализация

Статья получена: 04.07.2026
Статья принята: 29.07.2026

Computer Vision Systems.

Optical Foundations of Computer Vision: Image Formation, Calibration Methods, and Distortion Correction

V. Yu. Prozorov, Yu. A. Evstifeev, Yu. V. Rubtsov,
Deyton Central Design Bureau, Moscow, Zelenograd, Russia

This article opens a series of publications dedicated to the optical foundations of computer vision. The mathematical models of image formation are considered, such as the camera obscura, pinhole model, and thin lens equation. Geometric distortions (radial and tangential distortion) and methods for their correction using the polynomial models and homographic transformations are analyzed in detail. Formal statements of camera calibration problems and reprojection error minimization are presented. Photometric aspects are investigated, including illumination models, Retinex compensation, and histogram equalization. Noise suppression methods are considered (Gaussian filtering, bilateral filtering, non-local means). Special attention is given to the practical issues of improving metrological accuracy (subpixel localization, temperature compensation, multi-frame averaging).

Keywords: computer vision, optical calibration, pinhole model, distortion, homography, Zhang's method, reprojection error, photometry, Retinex, noise suppression, subpixel localization

Article received: July 04, 2026
Article accepted: July 29, 2026

INTRODUCTION

The process of obtaining digital images is the first and critically important stage in the operation of any computer vision system. It is at this stage that the physical

ВВЕДЕНИЕ

Процесс получения цифрового изображения – первый и критически важный этап работы любой системы компьютерного зрения. Именно на этом этапе происходит физическая регистрация электромагнитного излучения, отраженного или испущенного объектами сцены, и его преобразование в дискретный массив пиксельных значений. Качество этого преобразования (разрешение, динамический диапазон, геометрическая точность, уровень шумов) определяет верхнюю границу возможностей всех последующих алгоритмов – от выделения признаков до семантической интерпретации [1, 2].

Оптические основы компьютерного зрения формируются на пересечении геометрической оптики, фотометрии и теории обработки сигналов. Ключевая проблема заключается в том, что проекция трехмерного мира на двумерную плоскость является некорректной обратной задачей: бесконечное множество точек пространства отображается в одну и ту же точку изображения. Для восстановления пространственной структуры необходимы априорные модели (жесткие геометрические ограничения) и точная калибровка оптической системы [3].

Цель настоящей работы – систематизировать оптические модели, используемые в компьютерном зрении, формализовать методы калибровки и коррекции искажений, а также показать их влияние на точность последующего анализа. Статья открывает цикл публикаций о математическом аппарате (продолжение в [4]), робототехнических применениях компьютерного зрения и методах повышения его эффективности.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

1.1. Модель камеры-обскуры и пинхольная аппроксимация

Простейшей моделью формирования изображения является камера-обскура – темный ящик с точечным отверстием. В этой модели каждая точка сцены испускает луч, который проходит через отверстие и попадает на противоположную стенку, формируя перевернутое изображение (рис. 1). Математически такая модель эквивалентна центральной проекции: все лучи проходят через единый оптический центр [5].

Пинхольная модель описывает связь между мировыми координатами точки $X = (X, Y, Z)^T$ и ее проекцией $x = (x, y)^T$ на плоскости изображения:

$$s \cdot [x, y, 1]^T = K \cdot [R | t] \cdot [X, Y, Z, 1]^T,$$

registration of electromagnetic radiation reflected or emitted by the objects occurs, along with its transformation into a discrete array of pixel values. The quality of this transformation (resolution, dynamic range, geometric accuracy, noise level) determines the upper limit of capabilities for all subsequent algorithms: from the feature detection to semantic interpretation [1, 2].

The optical foundations of computer vision are formed at the intersection of geometric optics, photometry, and signal processing theory. The key problem lies in the fact that the projection of the three-dimensional world onto a two-dimensional plane is an ill-posed inverse problem, since an infinite number of spatial points are mapped to the same image point. Reconstruction of the spatial structure requires a priori models (rigid geometric constraints) and precise calibration of the optical system [3].

The purpose of this paper is to systematize the optical models used in the field of computer vision, formalize the calibration and distortion correction methods, and demonstrate their impact on the subsequent analysis accuracy. This article opens a series of publications related to the mathematical apparatus [4], robotic applications of computer vision, and methods for improving computer vision efficiency.

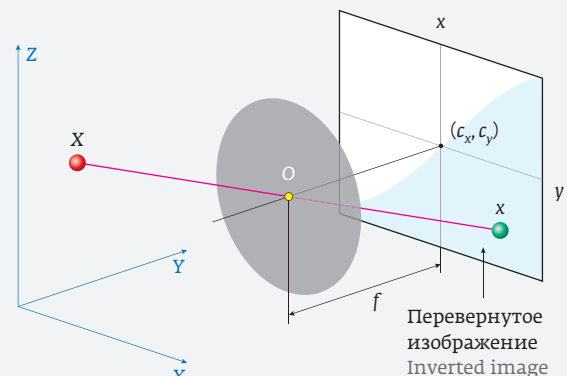


Рис. 1. Геометрия пинхольной модели: X – точка в мировом пространстве, O – оптический центр, x – проекция точки на плоскость изображения, f – фокусное расстояние, (c_x, c_y) – координаты главной точки

Fig. 1. Geometry of the pinhole model: X is a point in world space, O is the optical center, x is the point projection on the image plane, f is the focal length, (c_x, c_y) are the coordinates of the principal point

где: $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – матрица калибровки (внутренние параметры), $R \in SO(3)$ – матрица вращения, $t \in \mathbb{R}^3$ – вектор переноса (внешние параметры), s – масштабный коэффициент [3, 6]. Матрица калибровки имеет вид:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где: f_x, f_y – фокусные расстояния в пикселях; c_x, c_y – координаты главной точки (оптического центра); γ – коэффициент скошенности (обычно принимается равным нулю).

Полученное цифровое изображение представляет собой дискретизированную функцию интенсивности:

$$I: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^C,$$

где: $\Omega \subset \mathbb{Z}^2$ – дискретная пространственная область (матрица пикселей размерности $H \times W$); C – число спектральных каналов ($C=1$ для монохромных, $C=3$ для RGB, $C>3$ для гиперспектральных данных) [2].

1.2. Уравнение тонкой линзы

Реальные оптические системы используют линзы для сбора большего количества света. Уравнение тонкой линзы устанавливает связь между расстоянием до объекта u , расстоянием до изображения v и фокусным расстоянием объектива f :

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

При условии, что расстояние до объекта значительно превышает фокусное ($u \gg f$), выполняется приближение $v \approx f$, что оправдывает использование пинхолевой модели для большинства задач машинного зрения. Однако при работе на малых дистанциях (например, в макросъемке) необходимо учитывать конечное значение v .

1.3. Дискретизация и квантование

Процесс регистрации включает аналого-цифровое преобразование: непрерывный по координатам и интенсивности оптический сигнал заменяется дискретной матрицей пикселей с конечным числом уровней яркости (обычно 8 бит на канал). Шаг дискретизации (размер пикселя) и глубина квантования являются источниками принципиальных погрешностей: потеря высокочастотных деталей (aliasing) и ограничение динамического диапазона [1].

1. MATHEMATICAL IMAGE FORMATION MODELS

1.1. Model of Camera Obscura and Pinhole Approximation

The simplest image formation model is a camera obscura, namely a dark box with a pinhole aperture. In this model, each scene point emits a ray that passes through the aperture and strikes the opposite wall, thus forming an inverted image (Fig. 1). Mathematically, this model is equivalent to the central projection: all rays pass through a single optical center [5].

The pinhole model describes the relations between the world coordinates of a point $X=(X, Y, Z)^T$ and its projection $x=(x, y)^T$ on the image plane:

$$s \cdot [x, y, 1]^T = K \cdot [R|t] \cdot [X, Y, Z, 1]^T,$$

where: $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ is the calibration matrix (intrinsic parameters), $R \in SO(3)$ is the rotation matrix, $t \in \mathbb{R}^3$ is the translation vector (external parameters), and s is a scale factor [3, 6]. The calibration matrix has the following form:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

where: f_x, f_y are focal lengths in pixels, c_x, c_y are the coordinates of the principal point (optical center), and γ is the skew coefficient (usually assumed to be zero).

The resulting digital image represents a discretized intensity function:

$$I: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^C,$$

where: $\Omega \subset \mathbb{Z}^2$ is a discrete spatial domain (pixel matrix with the dimensions $H \times W$), and C is the number of spectral channels ($C=1$ for monochrome, $C=3$ for RGB, $C>3$ for hyperspectral data) [2].

1.2. Thin Lens Equation

Real optical systems include lenses to condense more light. The thin lens equation establishes the relations between the object distance u , the image distance v , and the focal length f :

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

Having assumed that the object distance significantly exceeds the focal length ($u \gg f$), the approximation $v \approx f$ holds is maintained that justifies the pinhole model application for most machine vision tasks.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ И ИХ КОРРЕКЦИЯ

2.1. Радиальная и тангенциальная дисторсия

Реальные объективы вносят нелинейные искажения, наиболее существенными из которых являются радиальная и тангенциальная дисторсия (рис. 2). Радиальная дисторсия вызвана сферической аберрацией линз и моделируется полиномом четных степеней от радиуса $r^2 = x^2 + y^2$ [3]:

$$x_{\text{corrected}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),$$

$$y_{\text{corrected}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),$$

где: k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии. Для большинства объективов достаточно двух коэффициентов; третий используется при сильных искажениях (рыбий глаз).

Тангенциальная дисторсия возникает из-за несоосности линз и описывается двумя дополнительными параметрами p_1, p_2 :

$$x_{\text{corrected}} = x + (2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)),$$

$$y_{\text{corrected}} = y + (p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy).$$

Полная модель коррекции комбинирует оба типа искажений.

2.2. Гомографические преобразования

При съемке плоскости с разных ракурсов связь между точками на изображениях описывается гомографией – проективным преобразованием плоскости на плоскость. Гомография $H \in \mathbb{R}^2$ задается матрицей 3×3 с точностью до масштаба [5]:

$$[x', y', w']^T = H \cdot [x, y, 1]^T,$$

где координаты изображения после преобразования получаются как $x' = x'/w'$, $y' = y'/w'$. Гомография имеет 8 степеней свободы и может быть вычислена по четырем соответствиям точек (не менее четырех). Она используется для выпрямления фронтальных плоскостей (например, исправление перспективных искажений при фотографировании документа) и для склейки панорам.

2.3. Калибровка камеры

Калибровка камеры – процесс определения внутренних параметров (матрица K , коэффициенты дисторсии) и, при необходимости, внешних

However, when working at short distances (e.g., in macro photography), the finite value of v must be considered.

1.3. Discretization and Quantization

The registration process includes the analog-to-digital conversion: the optical signal that is continuous in coordinates and intensity, is replaced by a discrete pixel matrix with a finite number of brightness levels (typically 8 bits per channel). The discretization step (pixel size) and quantization depth are the sources of fundamental errors: loss of high-frequency details (aliasing) and dynamic range limitation [1].

2. GEOMETRIC DISTORTIONS AND THEIR CORRECTION (ADJUSTMENT)

2.1. Radial and Tangential Distortion

The real lenses introduce nonlinear distortions, the most significant of which are radial and tangential distortions (Fig. 2). The radial distortion is caused by the spherical aberration of lenses and is modeled by an degree polynomial of the radius $r^2 = x^2 + y^2$ [3]:

$$x_{\text{corrected}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),$$

$$y_{\text{corrected}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),$$

where: k_1, k_2, k_3 are the radial distortion coefficients. For most lenses, two coefficients are sufficient; the third one is used for severe distortions (fisheye).

The tangential distortion occurs due to the lens misalignment and is described by two additional parameters p_1, p_2 :

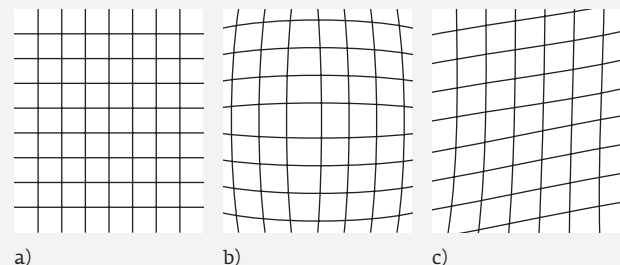


Рис. 2. Визуализация геометрических искажений:

а) объект без искажений; б) радиальная дисторсия; в) тангенциальная дисторсия

Fig. 2. Visualization of geometric distortions: а) object without any distortions; б) radial distortion; в) tangential distortion



параметров (R, t) для конкретной камеры. Наиболее распространен метод Чжана (Zhang, 2000) [6], использующий несколько изображений плоского калибровочного объекта (шахматной доски) с известной геометрией.

Алгоритм минимизирует репроекционную ошибку – среднеквадратичное отклонение между наблюдаемыми углами шахматной доски на изображениях и их перепроекциями согласно текущим оценкам параметров:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|x_{ij} - \pi(K, R_i, t_i, X_j)\|^2,$$

где π – функция проекции, включающая коррекцию дисторсии. Оптимизация выполняется методом Левенберга – Марквардта.

Альтернативой является прямая линейная трансформация (DLT), которая не требует итераций, но менее точна [5].

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОРРЕКЦИЯ ОСВЕЩЕНИЯ

3.1. Модель освещенности Ламберта

Распределение яркости на изображении определяется тремя факторами: освещенностью сцены, отражательными свойствами поверхностей (альбедо) и углом падения света. Простейшая модель Ламберта описывает интенсивность пикселя как произведение:

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y),$$

где: $R(x, y)$ – альбедо (отражательная способность); $L(x, y)$ – функция освещенности [1]. Такое представление мультипликативно и нелинейно, что затрудняет разделение компонент.

3.2. РЕТИНЕКС-КОМПЕНСАЦИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Метод ретинекса (Retinex) основан на предположении, что освещенность $L(x, y)$ является низкочастотной компонентой, а альбедо $R(x, y)$ высокочастотной. Переходя к логарифмической области, получаем аддитивное разделение:

$$\log I(x, y) = \log R(x, y) + \log L(x, y).$$

Компонента освещенности оценивается гауссовым сглаживанием исходного изображения [1, 2]:

$$L(x, y) = I(x, y) * G(x, y, \sigma),$$

$$x_{\text{corrected}} = x + (2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)),$$

$$y_{\text{corrected}} = y + (p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy).$$

The complete correction model combines both types of distortions.

2.2. Homographic Transformations

When imaging a plane from various viewpoints, the relationship between points in the images is described by a homography, which is a projective transformation from plane to plane. Homography $H \in P^2$ is determined by a 3×3 matrix up to scale [5]:

$$[x', y', w']^T = H \cdot [x, y, 1]^T,$$

where: the image coordinates after transformation are obtained as $x' = x'/w'$, $y' = y'/w'$. Homography has 8 degrees of freedom and can be computed based on four point correspondences (at least four). It is used for rectifying the frontal planes (e.g., adjustment of perspective distortions when photographing the documents) and for panorama stitching.

2.3. CAMERA CALIBRATION

Camera calibration is the process of determining intrinsic parameters (matrix K , distortion coefficients) and, if necessary, external parameters (R, t) for a specific camera. The most common method is the Zhang method (Zhang, 2000) [6] that uses multiple images of a planar calibration object (checkerboard) with the well-known geometry.

The algorithm minimizes the reprojection error that is the root mean square deviation between the observed checkerboard corners in the images and their reprojections current parameter estimates:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|x_{ij} - \pi(K, R_i, t_i, X_j)\|^2,$$

where π is the projection function, including any distortion correction. Optimization is performed using the Levenberg-Marquardt method.

An alternative method is direct linear transformation (DLT) that does not require any iterations but is less accurate [5].

3. PHOTOMETRIC ASPECTS AND ILLUMINATION CORRECTION

3.1. Lambertian Illumination Model

The brightness distribution in an image is determined by three factors, such as scene illumination, surface reflective properties (albedo), and the angle of light



где $G(x, y, \sigma)$ – гауссово ядро с параметром масштаба σ . Восстановленное альbedo (компенсированное изображение) вычисляется как:

$$R(x, y) = \exp(\log I(x, y) - \log L(x, y)).$$

На практике применяют многошкальный ретинекс (MSR), усредняющий результаты для нескольких σ , что позволяет подавлять неравномерность на разных пространственных частотах.

3.3. ГИСТОГРАММНАЯ ЭКВАЛИЗАЦИЯ

Для улучшения контраста и коррекции глобального распределения яркости применяют гистограммную эквализацию [1]. Преобразование T перераспределяет интенсивности так, чтобы гистограмма выходного изображения стремилась к равномерной:

$$s_k = T(r_k) = (L-1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j),$$

где: $p_r(r)$ – функция плотности вероятности исходной интенсивности, L – число уровней квантования (например, 256 для 8-битного изображения). Адаптивная гистограммная эквализация (CLAHE) применяет локальное преобразование в окнах размера $M \times N$ с ограничением наклона, что предотвращает чрезмерное усиление шума [2].

4. ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

4.1. Модели шумов

Основным источником шума в цифровых камерах является тепловой шум матрицы (CCD/CMOS), моделируемый как аддитивный гауссовский процесс:

$$I_{\text{noisy}}(x, y) = I_{\text{true}}(x, y) + \eta(x, y), \quad \eta \sim N(0, \sigma^2).$$

При низкой освещенности доминирует дробовой шум (распределение Пуассона), однако в большинстве практических задач достаточно гауссовской аппроксимации [1, 2].

4.2. Гауссово сглаживание

Простейший метод подавления шума – линейная фильтрация с гауссовым ядром:

$$I'(x, y) = \sum_u \sum_v G(u, v, \sigma) \cdot I(x+u, y+v).$$

Гауссово сглаживание эффективно уменьшает высокочастотные шумы, но одновременно размывает границы объектов, что нежелательно перед операциями детекции [1].

incidence. The simplest Lambertian model describes pixel intensity as the following product:

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y),$$

where: $R(x, y)$ is albedo (reflectance), and $L(x, y)$ is the illumination function [1]. This representation is multiplicative and nonlinear, making the component separation process difficult.

3.2. RETINEX COMPENSATION FOR NON-UNIFORM ILLUMINATION

The Retinex method is based on the assumption that illumination $L(x, y)$ is a low-frequency component, while albedo $R(x, y)$ is a high-frequency component. Transitioning to the logarithmic domain yields the additive separation:

$$\log I(x, y) = \log R(x, y) + \log L(x, y).$$

The illumination component is estimated by Gaussian smoothing of the original image [1,2]:

$$L(x, y) = I(x, y) * G(x, y, \sigma),$$

where $G(x, y, \sigma)$ is a Gaussian kernel with the scale parameter σ . The recovered albedo (compensated image) is computed as follows:

$$R(x, y) = \exp(\log I(x, y) - \log L(x, y)).$$

In practice, the multi-scale Retinex (MSR) is used, which averages the results for several σ values that allows suppression of non-uniformity at different spatial frequencies.

3.3. HISTOGRAM EQUALIZATION

The histogram equalization method is applied to improve contrast and adjust the global brightness distribution [1]. The transformation T redistributes intensities so that the output image histogram approaches uniformity:

$$s_k = T(r_k) = (L-1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j),$$

where: $p_r(r)$ is the probability density function of the original intensity, and L is the number of quantization levels (e.g., 256 for an 8-bit image). The adaptive histogram equalization (CLAHE) applies local transformation in $M \times N$ windows with slope limitation that prevents excessive noise amplification [2].



4.3. Билатеральная фильтрация

Для сохранения границ при подавлении шума используется билатеральная фильтрация [7]:

$$I'(x) = \frac{1}{W_p} \sum_{x_i \in \Omega} I(x_i) \cdot f_r(\|I(x_i) - I(x)\|) \cdot g_s(\|x_i - x\|),$$

где: f_r – ядро по разности яркостей (обычно гауссиана), g_s – пространственное ядро, W_p – нормировочный коэффициент. Благодаря сомножителю f_r пиксели с сильно отличающейся интенсивностью не участвуют в усреднении, что сохраняет перепады яркости.

4.4. Нелокальное среднее

Более современным методом является фильтр нелокального среднего (NLM) [8], который использует сходство не отдельных пикселей, а целых патчей (окрестностей):

$$I'(x) = \sum_{y \in \Omega} w(x, y) \cdot I(y); \quad w(x, y) = \frac{1}{Z(x)} \exp\left(-\frac{d^2(B(x), B(y))}{h^2}\right),$$

где: d^2 – квадрат евклидова расстояния между патчами $B(x)$ и $B(y)$; h – параметр фильтрации. NLM позволяет подавлять шум, сохраняя даже тонкие текстурные детали, однако обладает более высокой вычислительной сложностью.

5. ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КАЛИБРОВКИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ

5.1. Субпиксельная локализация

Для прецизионных измерений (например, калибровка камеры или контроль геометрических размеров) необходимо определять положение характерных точек с точностью до долей пикселя. Широко используется параболическая интерполяция по трем точкам (пиксель-кандидат и его соседи) [5]:

$$x_{\text{subpixel}} = x_{\text{pixel}} + \frac{I_{x-1} - I_{x+1}}{2(I_{x-1} - 2I_x + I_{x+1})}.$$

Аналогичная формула применяется для координаты y .

5.2. Температурная компенсация

Фокусное расстояние объектива и геометрические параметры камеры зависят от температуры. Для систем, работающих в широком диапазоне температур (например, на открытом воздухе или в промышленных цехах), необходима температурная компенсация:

$$f(T) = f_0 \cdot (1 + \alpha_f(T - T_0)),$$

4. NOISE SUPPRESSION IN THE OPTICAL SYSTEMS

4.1. Noise Models

The main source of noise in digital cameras is the thermal noise of the sensor (CCD/CMOS), modeled as an additive Gaussian process:

$$I_{\text{noisy}}(x, y) = I_{\text{true}}(x, y) + \eta(x, y), \quad \eta \sim N(0, \sigma^2).$$

Under low-light conditions, the shot noise (Poisson distribution) dominates, but in most practical tasks, the Gaussian approximation is sufficient [1,2].

4.2. Gaussian Smoothing

The simplest noise suppression method is linear filtering with a Gaussian kernel:

$$I'(x, y) = \sum_u \sum_v G(u, v, \sigma) \cdot I(x+u, y+v).$$

The Gaussian smoothing method efficiently reduces the high-frequency noise but simultaneously blurs object boundaries, which is undesirable prior to any detection operations [1].

4.3. Bilateral Filtering

To preserve the edges during the noise suppression procedure, bilateral filtering is used [7]:

$$I'(x) = \frac{1}{W_p} \sum_{x_i \in \Omega} I(x_i) \cdot f_r(\|I(x_i) - I(x)\|) \cdot g_s(\|x_i - x\|),$$

where: f_r is the intensity difference kernel (usually Gaussian), g_s is the spatial kernel, and W_p is a normalization factor. Due to the multiplier f_r , the pixels with significantly different intensities do not participate in the averaging procedure that preserves brightness edges.

4.4. Non-Local Means

A more modern method is the non-local means (NLM) filter [8] that applies similarity not of individual pixels but of entire patches (neighborhoods):

$$I'(x) = \sum_{y \in \Omega} w(x, y) \cdot I(y); \quad w(x, y) = \frac{1}{Z(x)} \exp\left(-\frac{d^2(B(x), B(y))}{h^2}\right),$$

where: d^2 is the squared Euclidean distance between the patches $B(x)$ and $B(y)$, and h is the filtering parameter. NLM allows noise suppression while preserving even fine texture details, but has higher computational complexity.



где α_f – температурный коэффициент дрейфа фокуса, определяемый экспериментально. Аналогичные зависимости вводятся для параметров дисторсии и положения главной точки.

5.3. Многокадровое усреднение

Для статических сцен или при работе с неподвижной камерой случайные погрешности (шум, флуктуации освещения) могут быть уменьшены путем усреднения нескольких последовательных кадров [2]:

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_k(x, y); \sigma'_I = \frac{\sigma_I}{\sqrt{M}}.$$

Этот метод особенно эффективен при использовании в задачах автоматического контроля качества на конвейере, где объект может оставаться неподвижным в течение нескольких циклов съемки [4].

ВЫВОДЫ

Проведенный систематический анализ оптических основ компьютерного зрения показывает, что точность и надежность любого алгоритма визуального анализа неразрывно связаны с качеством модели формирования изображения и коррекции искажений. Математические модели (пинхолевая камера, уравнение тонкой линзы, полиномы дисторсии) позволяют количественно описать преобразование «мир → изображение», а методы калибровки (алгоритм Чжана, DLT) – оценить неизвестные параметры.

Особое внимание уделено фотометрическим артефактам: неравномерному освещению, ограниченному динамическому диапазону, шумам регистрации. Для их компенсации успешно применяются ретинекс-алгоритмы, гистограммная эквализация и билатеральная фильтрация.

Практические методы повышения метрологической точности (субпиксельная локализация, температурная компенсация, многокадровое усреднение) позволяют достичь субпиксельной точности локализации и стабильности измерений в реальных промышленных условиях.

Данная работа является первой в цикле публикаций. В следующих работах авторы планируют детально рассмотреть математический аппарат компьютерного зрения, методы оценки расстояния в монокулярных системах и робототехнические приложения (позиционирование, навигация, управление на основе визуальной обратной связи).

5. PRACTICAL ASPECTS OF CALIBRATION AND METROLOGICAL ACCURACY

5.1. Subpixel Localization

For high-precision measurements (e.g., camera calibration or geometric dimension control), it is necessary to determine the position of feature points with subpixel accuracy. The parabolic interpolation method applying three points (candidate pixel and its neighbors) is widely used [5]:

$$x_{\text{subpixel}} = x_{\text{pixel}} + \frac{I_{x-1} - I_{x+1}}{2(I_{x-1} - 2I_x + I_{x+1})}.$$

A similar formula is applied for the y -coordinate.

5.2. Temperature compensation

The lens focal length and geometric parameters of the camera depend on temperature. For the systems operating over a wide temperature range (e.g., outdoors or in industrial workshops), the temperature compensation is necessary:

$$f(T) = f_0 \cdot (1 + \alpha_f(T - T_0)),$$

where: α_f is the temperature coefficient of focal drift that is determined experimentally. Similar dependencies are introduced for the distortion parameters and principal point position.

5.3. MULTI-FRAME AVERAGING

For static scenes or when working with a stationary camera, the random errors (noise, illumination fluctuations) can be reduced by averaging several consecutive frames [2]:

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_k(x, y); \sigma'_I = \frac{\sigma_I}{\sqrt{M}}.$$

This method is particularly effective when used in automated quality-control tasks on conveyors, where the object may remain stationary for several imaging cycles [4].

CONCLUSIONS

The conducted systematic analysis of computer vision optical foundations shows that the accuracy and reliability of any visual analysis algorithm are inextricably linked to the quality of the image formation model and distortion correction. The mathematical models (pinhole camera, thin lens equation, distortion polynomials) allow quantitative description of the “world → image” transformation, while calibration methods (Zhang’s algorithm, DLT) enable estimation of the unknown parameters.



REFERENCES

1. Forsajt D., Pons Zh. *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podhod.* – М.: Vil'yams, 2004. ISBN: 5-8459-0542-7
Форсайт Д., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход.* – М.: Вильямс, 2004. ISBN: 5-8459-0542-7
2. Shapiro L., Stokman Dzh. *Komp'yuternoe zrenie.* – М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015. ISBN: 978-5-9963-3003-4
Шапиро Л., Стокман Дж. *Компьютерное зрение.* – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. ISBN: 978-5-9963-3003-4
3. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications.* 2nd ed. – Cham: Springer, 2022.
4. Prozorov V., Evstifeev Yu., Rubtsov Yu. *Computer Vision Systems. Mathematical Apparatus, Processing Paradigms, and Modern Methodologies.* Photonics Russia. 2026; 20 (in print).
Прозоров В., Евстифеев Ю., Рубцов Ю. *Системы компьютерного зрения. Математический аппарат, парадигмы обработки и современные методологии.* Фотоника. 2026; 20 (в печати).
5. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision.* 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. ISBN-13: 978-1139639453
6. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2000;22(11):1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
7. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat No98CH36271). <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815>
8. Buades A., Coll B., Morel J.-M. A Non-Local Algorithm for Image Denoising. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* 2005; 2(7):60–65. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.38>

АВТОРЫ

Прозоров Вячеслав Юрьевич, техник АО «Центральное конструкторское бюро «Дейтон» (ЦКБ «Дейтон»), Москва, Зеленоград, Россия.

Евстифеев Юрий Алексеевич, к. т. н., профессор, АО «Центральное конструкторское бюро «Дейтон» (ЦКБ «Дейтон»), Москва, Зеленоград, Россия.
e-mail: medved55@mail.ru

Рубцов Юрий Васильевич, генеральный директор, главный конструктор, АО «Центральное конструкторское бюро «Дейтон» (ЦКБ «Дейтон»), Москва, Зеленоград, Россия.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Прозоров В. Ю. – оптическая и цифровая обработка изображений;
Евстифеев Ю. А. – разработка программ моделирования работы оптических элементов; Рубцов Ю. В. – организация проекта.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Particular attention is paid to the photometric artifacts, such as non-uniform illumination, limited dynamic range, and registration noise. The Retinex algorithms, histogram equalization, and bilateral filtering are successfully applied for their compensation.

Practical methods for improving metrological accuracy (subpixel localization, temperature compensation, multi-frame averaging) make it possible to achieve subpixel localization accuracy and measurement stability in the real industrial conditions.

In subsequent papers, the authors plan to examine in detail the mathematical apparatus of computer vision [4], distance estimation methods in the monocular systems, and robotic applications (positioning, navigation, control based on visual feedback).

AUTHORS

Prozorov V. Yu., technician, Deyton Central Design Bureau JSC, Moscow, Zelenograd, Russia.

Evstifeev Yu. A., Cand. of Sc. (Tech.), professor, Deyton Central Design Bureau JSC, Moscow, Zelenograd, Russia.
e-mail: medved55@mail.ru

Rubtsov Yu. V., director general, chief designer, Deyton Central Design Bureau JSC, Moscow, Zelenograd, Russia.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Prozorov V. – optical and digital image processing; Evstifeev Yu. A. – software for modeling the operation of optical elements; Rubtsov Yu. V. – project organization.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest.