DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(6)-35



Метод виртуальной камеры для локализации объектов в поле зрения сверхширокоугольной камеры

О.А. Заплатин, ORCID: 0009-0009-1873-3564 <oleg.zaplatin2015@yandex.ru>
С.В. Фёдоров, ORCID: 0009-0001-9406-3699 <svf@bmstu.ru>
Д.А. Локтев, ORCID: 0000-0002-8742-7837 <loktevdan@yandex.ru>

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1.

Аннотация. В статье рассматривается метод виртуальной камеры для локального устранения искажений в области интереса. Приведено описание разработанного алгоритма. Представлены результаты экспериментального исследования точности определения расстояния от камеры до объекта и вычислительных затрат предложенного метода и традиционных подходов. Показано, что алгоритм виртуальной камеры может быть эффективно интегрирован в интеллектуальные беспилотные системы для решения задач их взаимодействия с окружающими объектами в поле зрения широкоугольной камеры.

Ключевые слова: техническое зрение; сверхширокоугольная камера; коррекция дисторсии; виртуальная камера; локализация объектов; OpenCV.

Для цитирования: Заплатин О.А., Фёдоров С.В., Локтев Д.А. Метод виртуальной камеры для локализации объектов в поле зрения сверхширокоугольной камеры. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 6, часть 2, 2026 г., стр. 239–248. DOI: 10.15514/ISPRAS–2026–38(6)–35.

The virtual camera method for locating objects in the field of view of an ultra-wide-angle camera

O.A. Zaplatin, ORCID: 0009-0009-1873-3564 <oleg.zaplatin2015@yandex.ru>
S.V. Fedorov, ORCID: 0009-0001-9406-3699 <svf@bmstu.ru>
D.A. Loktev, ORCID: 0000-0002-8742-7837 <loktevdan@yandex.ru>

Bauman Moscow State Technical University,
Building 1, 5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia.

Abstract. The article discusses the virtual camera method for local elimination of distortions in the area of interest. The description of the developed algorithm is given. The results of an experimental study of the accuracy of determining the distance from the camera to the object and the computational costs of the proposed method and traditional approaches are presented. It is shown that the virtual camera algorithm can be effectively integrated into intelligent unmanned systems to solve problems of their interaction with surrounding objects in the field of view of a wide-angle camera.

Keywords: technical vision; ultra-wide angle camera; distortion correction; virtual camera; object localization; OpenCV.

For citation: Zaplatin O.A., Fedorov S.V., Loktev D.A. The virtual camera method for locating objects in the field of view of an ultra-wide-angle camera. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 6, part 2, 2026, pp. 239-248 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(6)-35.

1. Введение

Современный этап развития робототехники характеризуется стремительным расширением областей применения автономных систем – от промышленного производства и логистики до сельского хозяйства и бытовой робототехники. Беспилотные летательные аппараты, наземные мобильные платформы и манипуляционные роботы всё чаще функционируют в условиях, где непосредственное участие человека либо невозможно, либо экономически нецелесообразно. Ключевым требованием к таким системам является способность автономно воспринимать окружающую обстановку и принимать решения на основе получаемой сенсорной информации. В связи с этим одной из наиболее динамично развивающихся областей становится техническое зрение – совокупность методов и алгоритмов, позволяющих робототехническим комплексам извлекать значимую информацию из видеоизображений.

Для автоматического управления беспилотными системами нужно определять координаты объектов и углы поворота на предметы, с которыми взаимодействуют эти робототехнические комплексы [1]. Для решения данных задач необходимо первоначально определить расстояние R от камеры, расположенной на роботе до объекта. В настоящей работе рассматривается способ вычисления расстояния до объекта фиксированного известного размера по формуле пропорций $R = D/d \cdot f$, где D – физический размер объекта в метрах, d – размер объекта на изображении в пикселях, f – фокусное расстояние камеры в пикселях [2]. В этой формуле изменяемой величиной является только размер объекта на изображении. Следовательно, для взаимодействия робототехнических систем с объектами известного размера необходимо корректно вычислять именно этот параметр.

В то же время для охвата больших рабочих зон используются сверхширокоугольные камеры типа «рыбий глаз» с углом обзора более 180°. Одна такая камера способна заменить несколько обычных, что снижает стоимость системы. Однако широкое внедрение данных камер в ответственные контуры управления сдерживается проблемой значительной радиальной дисторсии. Эта оптическая аберрация приводит к сильному искажению формы и размеров объектов, особенно на краях поля зрения камеры [3] (рис. 1).



Рис. 1. Исходное изображение с дисторсией.
Fig. 1. The original image with distortion.

К традиционным подходам определения контуров на изображении с широкоугольной камеры относятся:

- Анализ исходного искажённого изображения;
- Поиск контуров на изображении, на котором дисторсия удалена глобально.

Глобальное устранение дисторсии заключается в перестроении всего изображения с использованием заранее рассчитанных карт преобразования пикселей [4].

Однако для сверхширокоугольных камер метод глобального удаления дисторсии имеет существенный недостаток. Из-за интерполяции пикселей при проецировании сильно искажённого изображения [5] объекты на периферии кадра подвергаются значительному растяжению: их линейные размеры перестают соответствовать реальным [6]. Как следствие, применение глобальной коррекции не позволяет решить задачу точных метрических измерений по всему полю зрения сверхширокоугольной камеры.

Таким образом, разработка специализированных алгоритмов обработки изображений, учитывающих особенности широкоугольной оптики и обеспечивающих высокую точность локализации объектов, является актуальной научно-технической задачей.

2. Постановка задачи

Целью работы является разработка алгоритма обработки видеопотока с широкоугольной камеры, обеспечивающего высокую точность определения расстояния от камеры до объекта известного фиксированного размера.

Задачи исследования:

- Рассмотрение особенностей глобального устранения дисторсии;
- Разработка и описание алгоритма предварительной обработки изображений, обеспечивающего корректное устранение дисторсии в области интереса;
- Сравнение вычислительных затрат алгоритмов обнаружения контуров объекта на трёх видах изображений: исходном искажённом кадре, снимке, на котором дисторсия удалена глобально и виртуальном изображении;
- Исследование точности определения расстояния от камеры до объекта фиксированного известного размера посредством анализа его контуров на трёх видах изображений с помощью тестового алгоритма;

В качестве исследуемого объекта в настоящей работе используется оранжевый мяч для настольного тенниса диаметром 40 мм, поэтому анализ контуров проводится с помощью цветовой сегментации.

3. Метод глобального устранения дисторсии

В основе метода лежит математическая модель калибровки камеры «рыбий глаз» [7], опирающаяся на модель камеры-обскуры [8] (рис. 2).

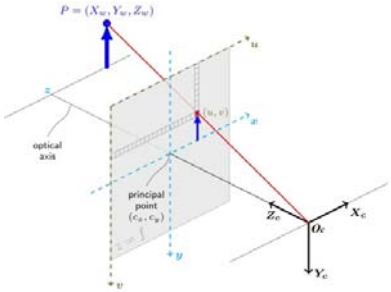


Рис. 2. Модель камеры-обскуры [8].
Fig. 2. Pinhole Camera Model [8].

На рис. 2 представлен объект $P = (X_w, Y_w, Z_w)$ в системе координат камеры (O_c, X_c, Y_c, Z_c). В фокальной плоскости $z = f$ размещается изображение, центр которого имеет координаты (c_x, c_y). (u, v) – проекция пространственных координат объекта P на плоскость изображения.

В глобальном методе коррекции дисторсии (рис. 3) в функцию initUndistortRectifyMap из библиотеки OpenCV [8] кроме прочих параметров передаются единичная матрица поворота $R = I$, а также исходная матрица внутренних параметров камеры K, в которой содержатся фокусные расстояния f_x и f_y по осям x и y соответственно.



Рис. 3. Глобальное устранение дисторсии на изображении.
Fig. 3. Global elimination of distortion in the image.

Однако из-за сверхширокого угла обзора применение глобального преобразования приводит к тому, что объекты, расположенные на краях исправленного кадра, подвергаются сильному растяжению. Интерполяционные алгоритмы не могут компенсировать тот факт, что один пиксель на периферии исходного изображения соответствует значительно большей области пространства, чем в центре. В результате центральная область кадра становится геометрически правильной, однако объект на периферии сильно растянут, что делает невозможным точное измерение его размеров с помощью анализа контура.

4. Алгоритм виртуальной камеры

В связи с этим в настоящей работе был предложен и реализован алгоритм виртуальной камеры. Данный метод вместо глобального исправления всего кадра осуществляет локальную коррекцию дисторсии лишь в области интереса, содержащей искомый объект. Для выполнения алгоритма необходимо рассчитать азимутальный угол φ, зенитный угол θ и его проекции θ_x и θ_y на плоскости XZ и YZ соответственно (рис. 4).

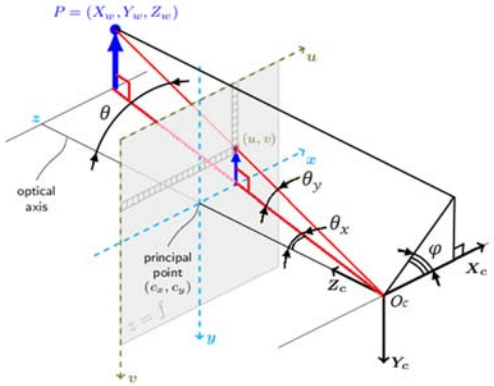


Рис. 4. Модель камеры-обскуры в контексте локального устранения дисторсии.
Fig. 4. Pinhole camera model in the context of local distortion elimination.

Алгоритм виртуальной камеры состоит из следующих этапов:

1) На исходном кадре с дисторсией размером $W_{in} \times H_{in}$ проводится цветовая сегментация, определяются контуры интересующего объекта и рассчитываются координаты его центра [9];
2) Формируется матрица внутренних параметров виртуальной камеры K', в которой содержатся масштабированные фокусные расстояния f_x' и f_y', рассчитываемые по формулам $f_x' = f_x \cdot W_{out}/W_{in}$ и $f_y' = f_y \cdot H_{out}/H_{in}$, где W_{out} и H_{out} – соответственно ширина и высота виртуального изображения;
3) Составляется матрица поворота R на центр объекта, которая содержит углы θ_x и θ_y, рассчитываемые по формулам $\theta_x = arctan\,(tan\,\theta \cdot sin\,\varphi)$ и $\theta_y = arctan\,(tan\,\theta \cdot cos\,\varphi)$;
4) Кроме прочих параметров в функцию initUndistortRectifyMap передаются рассчитанные матрицы R и K', что позволяет сгенерировать карты преобразования пикселей для поворота виртуальной оптической оси на объект и коррекции дисторсии в ограниченном секторе поля зрения широкоугольной камеры;
5) Выполняется перерасчет пикселей [10] только локальной области, в результате чего получается виртуальное изображение (рис. 5), соответствующее съёмке камерой с узким полем зрения, наведённой непосредственно на объект.



Рис. 5. Виртуальное изображение.
Fig. 5. A virtual image.

Такой подход позволяет полностью устранить влияние дисторсии на геометрию объекта, а также значительно снизить вычислительную нагрузку, поскольку коррекция выполняется не для всего кадра, а лишь для небольшой области вокруг области интереса. В результате работы алгоритма виртуальной камеры объект приобретает свою естественную форму, пригодную для метрического анализа.

5. Экспериментальное исследование

5.1 Сравнение вычислительных затрат рассматриваемых алгоритмов

В ходе экспериментального исследования были проведены измерения вычислительных затрат каждого метода, усреднённые результаты которых представлены в табл. 1.

Табл. 1. Усреднённые вычислительные затраты исследованных методов.
Table 1. Average computational costs of the investigated methods.

	Время обработки кадра, мс	Использованная память, КБ	Использованное ОЗУ, МБ
Исходное изображение	6,8	4279	91,6
Глобальное устранение дисторсии	44,5	120964	215
Виртуальное изображение	60,6	57022	111,5

Обработка исходного изображения характеризуется наименьшими временем выполнения алгоритма – 6,8 мс, потреблением ОЗУ – 91,6 МБ и выделением памяти под обработку данных – 4279 КБ.

Метод глобальной коррекции дисторсии требует значительных вычислительных затрат: время обработки составляет 44,5 мс, а потребление оперативной памяти достигает 215 МБ. Память, необходимая для обработки данных, составляет 120964 КБ, что более чем в 28 раз превышает аналогичный показатель для исходного изображения.

Предложенный метод виртуальной камеры занимает промежуточное положение по временным затратам – 60,6 мс, однако существенно превосходит глобальную коррекцию по эффективности использования памяти. Потребление RAM составляет 111,5 МБ, а выделенная под обработку память – 57022 КБ, что почти вдвое меньше, чем при глобальной коррекции.

5.2 Сравнение точности измерения расстояния от камеры до объекта

Для сравнения точности определения расстояния от камеры до объекта по трём видам изображений необходимо разработать тестовый алгоритм и экспериментальную установку.

Тестовый алгоритм состоит из следующих этапов:

- Цветовая сегментация изображения;
- Выделение контура объекта;
- Вычисление радиуса минимальной охватывающей контур объекта окружности;
- Расчёт расстояния от камеры до объекта по формуле пропорций.

Тестовый алгоритм применяется для трёх видов изображений:

- Исходного изображении с дисторсией;
- Изображения, на котором дисторсия глобально удалена;

- Виртуального изображения.

Для проведения исследования была разработана экспериментальная установка (рис. 6).

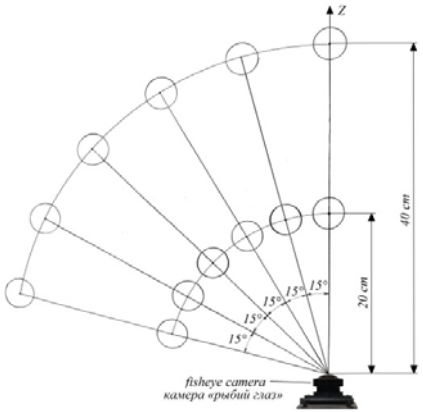


Рис. 6. Экспериментальная установка.
Fig. 6. Experimental installation.

В ходе эксперимента объект располагается в плоскости поперечного сечения камеры на расстояниях 0,2 м и 0,4 м от объектива. На этих расстояниях от камеры объект последовательно размещается под углами 0°, 15°, 30°, 45°, 60° и 75° к главной оптической оси z. Далее сохраняются 12 исходных изображений с дисторсией в описанных выше положениях. Затем создаётся 2 набора копий исходных изображений. На каждом изображении первого набора копий дисторсия удаляется глобально. Каждое изображение второго набора копий преобразуется в виртуальное изображение с помощью разработанного метода. На этом этапе создано 12 кадров каждого вида изображения: 6 снимков на расстоянии 0,2 метра и 6 снимков на расстоянии 0,4 метра. Далее к каждому из 36 изображений применяется тестовый алгоритм определения расстояния от камеры до объекта.

Результаты экспериментального исследования ошибки измерения расстояния рассматриваемыми методами при расположении объекта на дистанциях 0,2 метра и 0,4 метра от камеры представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

Анализируя эти графики, можно сделать следующие выводы:

- Измерение расстояния до объекта на исходном искажённом изображении даёт приемлемые результаты с ошибкой менее 10% только при малых углах отклонения до 30°-45°. При увеличении угла до 75° ошибка возрастает до 14-20%. Это объясняется радиальной дисторсией, которая приводит к изменению размеров объекта на периферии кадра;
- Глобальная коррекция дисторсии обеспечивает ошибку измерения расстояния менее 10% лишь в узком диапазоне углов до 15°-30°. При углах отклонения 45° и более наблюдается резкое возрастание ошибки: на 60° она составляет 57-65%, а на 75° достигает 77-79%. Данный эффект обусловлен интерполяционным растяжением пикселей на краях исправленного изображения, что делает метод непригодным для измерения расстояния на периферии поля зрения;
- Предложенный метод виртуальной камеры демонстрирует стабильную точность во всём исследованном диапазоне углов отклонения объекта от главной оптической оси от 0° до 75° на расстояниях 20 см и 40 см. Ошибка измерения расстояния не превышает 1%, что подтверждает эффективность метода локальной коррекции дисторсии.

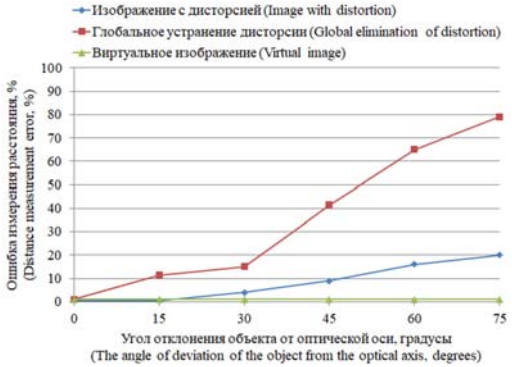


Рис. 7. Зависимость ошибки измерения расстояния от угла отклонения объекта на дистанции 0,2 м.
Fig. 7. The dependence of the distance measurement error on the angle of deviation of the object at a distance of 0,2 m.

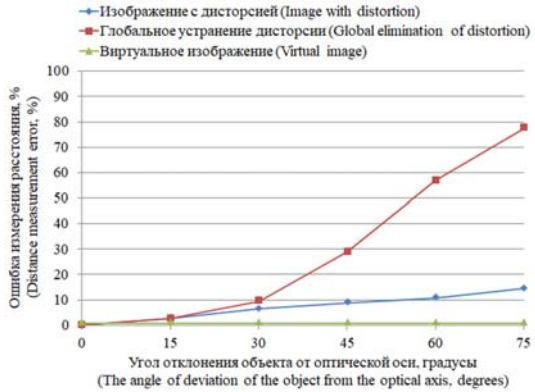


Рис. 8. Зависимость ошибки измерения расстояния от угла отклонения объекта на дистанции 0,4 м.
Fig. 8. The dependence of the distance measurement error on the angle of deviation of the object at a distance of 0,4 m.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что предложенный метод виртуальной камеры обеспечивает стабильно высокую точность определения геометрических размеров объекта во всём поле зрения широкоугольной камеры. Следовательно, алгоритм локального устранения дисторсии может быть применён для решения задач взаимодействия интеллектуальных беспилотных систем с окружающими объектами посредством широкоугольной камеры.

6. Заключение

В работе проведён анализ ограничений способа глобальной коррекции дисторсии на изображении, полученном с широкоугольной камеры. Представлен, описан и экспериментально исследован метод виртуальной камеры, обеспечивающий локальную коррекцию дисторсии в системах технического зрения. Реализован тестовый алгоритм для вычисления расстояния от камеры до объекта фиксированного известного размера. Экспериментально подтверждено, что метод виртуальной камеры обеспечивает стабильную точность измерений во всём рабочем пространстве широкоугольной камеры с погрешностью,

не превышающей 1%, в то время как традиционные подходы дают недопустимо большие ошибки на периферии кадра. Проведено сравнение вычислительных затрат рассматриваемых методов. По итогам экспериментального исследования было определено, что предложенный алгоритм виртуальной камеры может быть эффективно интегрирован в интеллектуальные беспилотные системы.

Список литературы / References

[1]. Алфимцев А.Н., Локтев Д.А., Локтев А.А. Сравнение методологий разработки систем интеллектуального взаимодействия. Вестник МГСУ, 2013, № 5, стр. 200-208. EDN: QBAYYJ. / Alfimtsev A.N., Loktev D.A., Loktev A.A. Comparison of methodologies for developing intelligent interaction systems. Vestnik MGSU, 2013, issue 5, pp. 200-208 (in Russian).

[2]. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 11 (23), стр. 4. EDN: RPZGXD. / Loktev D.A., Alfimtsev A.N. Measuring distance to a moving object using a comprehensive video monitoring system. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii, 2013, issue 11 (23), p. 4 (in Russian).

[3]. Kannala J., Brandt S.S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, vol. 28, no. 8, pp. 1335–1340. DOI: 10.1109/TPAMI.2006.153.

[4]. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer, 2022, 925 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9.

[5]. Kholopov I.S. Projective distortion correction algorithm at low altitude photographing. Computer Optics, 2017, vol. 41, no. 2, pp. 284–290. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-284-290.

[6]. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718.

[7]. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004, 672 p. DOI: 10.1017/CBO9780511811685.

[8]. OpenCV: Camera Calibration. Available at: https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html, accessed 10.03.2026.

[9]. Локтев А.А., Алфимцев А.Н., Локтев Д.А. Алгоритм распознавания объектов. Вестник МГСУ, 2012, № 5, стр. 194–201. EDN: PDBNLV. / Loktev A.A., Alfimtsev A.N., Loktev D.A. Object recognition algorithm. Vestnik MGSU, 2012, issue 5, pp. 194–201 (in Russian).

[10]. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 2008, 555 p. ISBN: 9780596516130.

Информация об авторах / Information about authors

Олег Александрович ЗАПЛАТИН – студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: компьютерное зрение, распознавание образов, встраиваемые системы.

Oleg Alexandrovich ZAPLATIN – student of Bauman Moscow State Technical University. Research interests: computer vision, pattern recognition, embedded systems.

Сергей Владимирович ФЁДОРОВ – доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: проектирование цифровых устройств на ПЛИС, параллельные спецвычислители на ПЛИС, цифровая обработка сигналов, операционные системы реального времени, встроенные системы на микроконтроллерах и цифровых сигнальных процессорах.

Sergey Vladimirovich FEDOROV – Associate Professor of Bauman Moscow State Technical University. Research interests: design of digital devices based on FPGA, parallel FPGA special calculators, digital signal processing, real-time operating systems, embedded systems on microcontrollers and digital signal processors.

Даниил Алексеевич ЛОКТЕВ – доктор технических наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: компьютерное зрение, распознавание объектов, системы

видеомониторинга и распознавания ситуаций, методы определения пространственных характеристик объектов, информационная безопасность.

Daniil Alekseevich LOKTEV – Dr. Sci. (Tech.), Professor of Bauman Moscow State Technical University. Research interests: computer vision, object recognition, video monitoring and situation recognition systems, methods for determining spatial characteristics of objects, information security.