Оригинальная статья / Original article

УДК 004.932

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-107-122

CC BY 4.0

Подход для измерения геометрических параметров объектов с использованием цифровых камер

К. Д. Коновалов [1] ✉

[1] Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПБ ФИЦ РАН)
14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: kodmko@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Целью работы является разработка обобщенного метода оценки геометрических параметров объекта по фотоснимкам в условиях отсутствия информации об априорных параметрах объекта, а также с возможностью использования для произведения снимков цифровых камер с различными оптическими системами.*

Методы. *Для реализации поставленной цели была разработана математическая модель оптической системы, состоящей из двух цифровых камер. Затем, путем приведения данной математической модели к единой системе уравнений, был разработан метод вычисления координат объекта на снимке, а также расстояния до него. Затем была проведена экспериментальная проверка полученного метода.*

Результаты. *Результатом работы является разработанный обобщенный метод оценки геометрических параметров объекта в условиях отсутствия информации об априорных параметрах объекта с использованием двух снимков с цифровых камер с различными оптическими системами. Выполнена экспериментальная проверка точности работы разработанного метода при вычислении расстояния до объекта с использованием типовых камер с различными объективами, показавшая, что данный метод позволяет оценивать геометрические параметры объектов с точностью 90% и выше в зависимости от точности измерения технических параметров камер. Также была произведена оценка чувствительности разработанного методы к значениям технических параметров используемых цифровых камер.*

Заключение. *Произведенные экспериментальные проверки показали, что разработанный метод позволяет с высокой точностью оценивать расстояние до объектов с использованием снимков с двух цифровых камер, однако требует высокой точности измерения технических параметров используемых камер. В качестве дальнейших путей развития данного метода можно отметить возможность повышения точности измерений путем добавления в разработанную математическую модель нелинейных искажений (дисторсии).*

Ключевые слова: *определение расстояний; экспертиза цифровых изображений; модель камера-обскура; математическое моделирование; стереозрение.*

Конфликт интересов: *Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Коновалов К. Д. Подход для измерения геометрических параметров объектов с использованием цифровых камер // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 107-122. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-107-122.

Поступила в редакцию 10.12.2024 *Подписана в печать 28.01.2024* *Опубликована 14.04.2025*

© Коновалов К. Д., 2025

Approach for measuring geometric parameters of objects using digital cameras

Konstantin D. Konovalov [1] ✉

[1] St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: kodmko@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *The purpose of the research is to develop a generalized method for estimating the geometric parameters of an object from photographs in the absence of information about the a priori parameters of the object, as well as with the possibility of using digital cameras with various optical systems to produce images.*

Methods. *To achieve this goal, a mathematical model of an optical system consisting of two digital cameras was developed. Then, by reducing this mathematical model to a single system of equations, a method was developed for calculating the coordinates of an object in an image, as well as the distance to it. Then the experimental verification of the obtained method was carried out.*

Results. *The result of the work is a generalized method for estimating the geometric parameters of an object in the absence of information about the a priori parameters of the object using two images from digital cameras with different optical systems. An experimental verification of the accuracy of the developed method was performed when calculating the distance to an object using standard cameras with different lenses, which showed that this method allows estimating the geometric parameters of objects with an accuracy of 90% or higher, depending on the accuracy of measuring the technical parameters of the cameras. The sensitivity of the developed method to the values of the technical parameters of the digital cameras used was also evaluated.*

Conclusion*. Experimental tests have shown that the developed method allows us to accurately estimate the distance to objects using images from two digital cameras, however, it requires high accuracy in measuring the technical parameters of the cameras used. As further ways of developing this method, it is possible to note the possibility of increasing the accuracy of measurements by adding nonlinear distortions (distortions) to the developed mathematical model.*

Keywords: *calculation of distances; expertise of digital images; pinhole camera model; mathematical modeling; stereo vision.*

Conflict of interest. *The Author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Konovalov K. D. Approach for measuring geometric parameters of objects using digital cameras // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 107-122 (In Russ.). https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-107-122.

Received 10.12.2024 *Accepted 28.01.2025* *Published 14.04.2025*

***

Введение

Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются одним из наиболее активно развивающихся типов робототехнических систем. Одной из основных составляющих их систем управления являются системы навигации, позволяющие БПЛА определять собствен-

ное местоположение, а также выполнять полетное задание. Одним из наиболее перспективных типов систем навигации БПЛА являются системы видеонавигации. Данные системы в качестве источника данных используют фото- или видеоданные с бортовых камер (в случае использования одновременно нескольких камер используется понятие «стереозрение» [1]), а также, в ряде случаев, информацию о местности, в которой производится полет [2].

Сегодня существуют различные подходы к созданию систем видеонавигации БПЛА. Однако в их рамках решается ряд типовых задач. Одной из таких задач является необходимость измерения расстояния до объектов, а также их геометрических параметров с использованием снимков с бортовых камер. Например, подобная задача может решаться для определения высоты полета БПЛА, как описано в [3, 4]. В общем виде она может быть описана следующим образом: в качестве входных данных используются два снимка с разных бортовых камер БПЛА, на которых запечетлен некоторый объект на поверхности земли. Необходимо, используя данные два снимка, определить расстояние от БПЛА до объекта. Также известны технические параметры обеих бортовых камер, при этом сами бортовые камеры могут отличаться друг от друга по данным характеристикам.

При этом разработка методов измерения расстояния от камеры до объектов, а также их линейных размеров, с использованием только изображения с камеры, является актуальной и в ряде других задач, связанных с технологиями дополненной реальности и системами компьютерного зрения. Эффективный алгоритм её решения может помочь в решении более сложных задач, например, в повышении качества создаваемых 3D-моделей в методах фотограмметрии, а также в разработке и оптимизации SLAM-методов.

Материалы и методы

На сегодняшний день разработаны решения, позволяющие с высокой точностью оценивать расстояния до объектов по цифровым фотографиям в тех случаях, когда известны некоторые априорные параметры объекта, расстояние до которого необходимо вычислить. Так, в работе [5] автор указывает, что точность определения расстояния в таком случае составляет 1,2 – 2,4 %. Однако в некоторых случаях необходимо производить такую операцию для объектов с заранее неизвестными параметрами. В таких случаях известные подходы не применимы, поскольку при попытке перевести координаты из 3-мерных (объекты в физическом пространстве) в 2-мерные (изображение объектов на фотографии) решение будет получено в виде луча, на котором располагается искомая точка, без возможности вычислить конкретные ее координаты.

В таких случаях можно вычислить координаты, если известны априорные геометрические параметры объекта (на-

пример, если необходимо вычислить расстояние до жилого здания можно считать высоту этажа приближенно равной 3 метрам), однако такой подход возможен далеко не всегда, а если возможен, может внести существенные погрешности в итоговый результат в случае неверной оценки параметров объекта. В качестве варианта решения данной задачи может быть использован метод, позволяющий вычислять расстояние с использованием изображений, полученных с камеры, имеющей заметные нелинейные искажения (дисторсию). Подобное использование известных особенностей самой камеры как измерительного устройства ранее рассматривались, например в [6, 7].

Другим подходом к решению задачи измерения геометрических параметров объектов с использованием изображений является использование комбинированной измерительной системы, включающей в себя камеру и дополнительное измеряющее устройство, например, лазер. Примеры подобных систем описаны в [8, 9]. Подобные системы позволяют добиться высокой точности измерений. Так, в [9] отмечается, что погрешность вычисления расстояния составила ±3 см при измеряемой дистанции до 1,5 метров. Однако в случае с БПЛА применение подобных систем не всегда возможно, поскольку может требовать установки на БПЛА дополнительных аппаратных средств (лазеров), которые могут не быть предусмотрены конструктивно.

Также, в соответствии с современными тенденциями, ведутся активные разработки в области создания системы измерения геометрических параметров на основе фото- или видеоданных с использованием систем искусственного интеллекта. Примеры подобных систем можно найти в работах [10-12]. Системы подобного типа являются достаточно перспективными и, вероятно, с течением времени и улучшением качества работы систем искусственного интеллекта будут применяться все в больших объемах. Однако на сегодняшний день точность работы подобных систем недостаточно высока. Так, в [10] авторы отмечают, что при использовании для измерения расстояния до предметов, находящихся на большом удалении (более нескольких метров), погрешность измерения сильно возрастает и может составлять более 20%. Подобная погрешность превышает допустимые значения для поставленной задачи.

Вариант измерения линейных размеров объектов с помощью камер с различными оптическими системами является предметом рассмотрения в данной статье. В отличие от известных методов определения расстояний до объекта с использованием стереозрения с парой идентичных камер [13-15], в данной работе рассматривается обобщенный случай с использованием системы камер с различными оптическими системами с последующим переходом на использование одной карты с известными калиброванными характеристиками оптической системы.

В данной работе для удобства будет рассматриваться математическая модель камеры, соответствующая камере «камера-обскура». Она описывает фотокамеру с двумя допущениями: во-первых, диафрагма представляется в виде точки, а не отверстия некоторого диаметра. За счёт этого можно считать, что каждый пиксель в изображении освещается единственным лучом, а не световым пучком. Во-вторых, в модели «камера-обскура» игнорируется система линз, используемая для фокусировки света [16]. За счёт этого можно игнорировать вносимые ими искажения, например, дисторсию.

Рассмотрим вначале систему, состоящую из одной камеры. В ней присутствуют две системы координат – первая (назовем её $O_1X_1Y_1Z_1$) является трёхмерной системой координат, в которой в дальнейшем мы будем определять координаты объекта. Будем считать начало системы координат привязанным к точке, являющейся диафрагмой камеры. При этом ось O_1Z_1 направлена в направлении обзора камеры и называется оптической осью, главной осью или главным лучом [16]. Вторая система координат (назовем её $r_1x_1y_1$) является локальной двумерной системой координат плоскости изображения. Ее центр и ориентацию также в общем случае можно выбрать произвольными, но для уменьшения требуемых операций преобразования координат можно принять следующие правила: во-первых, центр данной системы координат r_1 расположен в точке пересечения оптической оси с плоскостью изображения. В этом случае r_1 будет являться главной точкой изображения, то есть его центром. Во-вторых, оси r_1x_1 и r_1y_1 сонаправлены с осями O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно. В этом случае расстояние между точками r_1 и O_1 будет известно и равно фокусному расстоянию f_1 используемой камеры.

В рамках данной системы рассмотрим две точки. Первую обозначим как P с координатами в трехмерной системе (X_1, Y_1, Z_1). Это та точка, расстояние до которой необходимо вычислить в процессе решения. Вторую точку обозначим как Q_1 с координатами в двухмерной системе (x_1, y_1). Эта точка является проекцией точки P на плоскость изображения. Соответственно, точки P и Q_1 находятся на одной линии, проходящей через диафрагму камеры. Схематично изображение рассматриваемой системы с изображением данных точек приведено на рис. 1.

Для рассматриваемой системы известны соотношения, описывающие связь координат точек P и Q_1 [16]:

$$\begin{cases} \dfrac{-x_1}{f_1} = \dfrac{X_1}{Z_1} \\ \dfrac{-y_1}{f_1} = \dfrac{Y_1}{Z_1} \end{cases} \quad (1)$$

или

$$\begin{cases} x_1 = -\dfrac{f_1 \cdot X_1}{Z_1} \\ y_1 = -\dfrac{f_1 \cdot Y_1}{Z_1}. \end{cases} \quad (2)$$

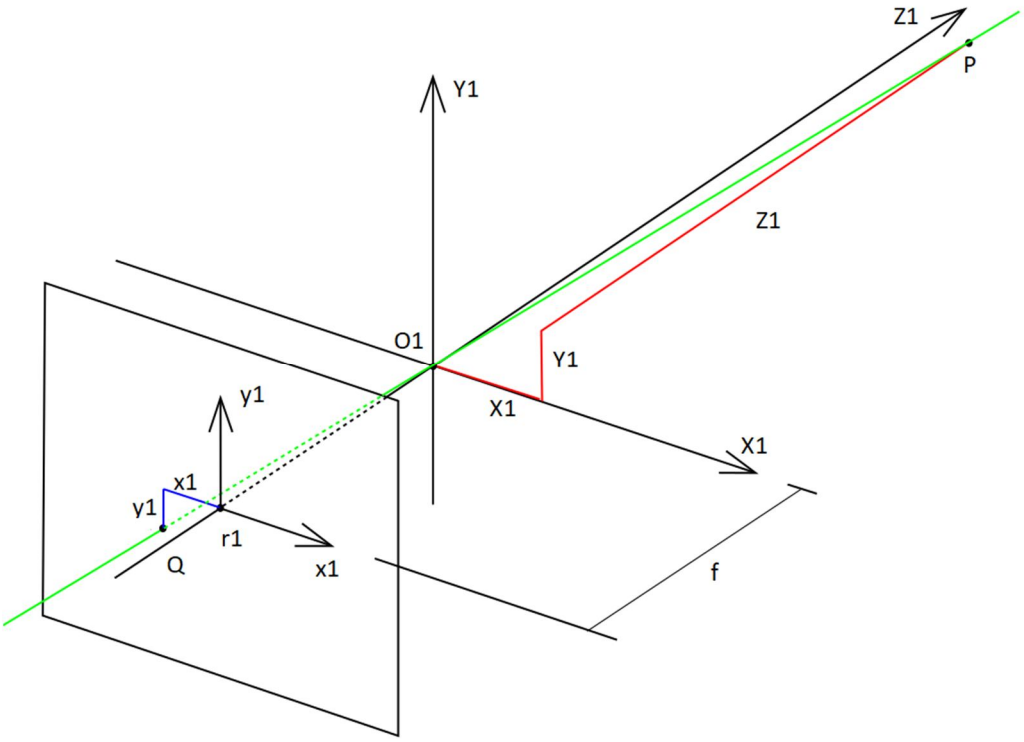

Рис. 1. Геометрическая система рассматриваемой модели камеры

Fig. 1. Geometric system of the camera model in question

Как уже упоминалось выше, для вычисления расстояния до объекта будут использоваться два изображения с двух разных камер. Модель второй камеры опишем с помощью аналогичной геометрической модели, где индексы переменных заменим с 1 на 2. Точка P остается неизменной, однако в новой трехмерной системе координат она будет иметь новые координаты (X_2, Y_2, Z_2). Также она будет иметь проекцию на плоскость изображения второй камеры Q_2 с координатами в двухмерной системе (x_2, y_2). Тогда, аналогично формулам (1) и (2) получаем:

$$\begin{cases} \dfrac{-x_2}{f_2} = \dfrac{X_2}{Z_2} \\ \dfrac{-y_2}{f_2} = \dfrac{Y_2}{Z_2} \end{cases} \qquad (3)$$

или

$$\begin{cases} x_2 = -\dfrac{f_2 \cdot X_2}{Z_2} \\ y_2 = -\dfrac{f_2 \cdot Y_2}{Z_2}. \end{cases} \qquad (4)$$

Также для вычисления расстояния до объекта необходимо знать величину сдвига камер относительно друг друга (величину базы). Далее будем выражать его в виде сдвига трёхмерных систем координат, привязанных к камерам, и обозначим вектором смещений (dX, dY, dZ). Для упрощения будем считать, что плоскости изображений обоих камер параллельны и их системы координат ориентированы одинаково. В противном случае при переходе из одной системы координат в другую необходимо дополнительно пересчитывать углы по-

ворота. В данном же случае можно получить более простой вариант преобразования координат:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + dX \\ Y_2 = Y_1 + dY \\ Z_2 = Z_1 + dZ. \end{cases} \quad (5)$$

Далее подставим (5) в (3) и объединим результат в единую систему уравнений с (1). Данное действие возможно, поскольку обе системы описывают одну и ту же точку P. Получаем:

$$\begin{cases} \frac{-x_1}{f_1} = \frac{X_1}{Z_1} \\ \frac{-y_1}{f_1} = \frac{Y_1}{Z_1} \\ \frac{-x_2}{f_2} = \frac{X_1 + dX}{Z_1 + dZ} \\ \frac{-y_2}{f_2} = \frac{Y_1 + dY}{Z_1 + dZ}. \end{cases} \quad (6)$$

В левых частях уравнений не содержится неизвестных, поэтому их значения могут быть вычислены, переобозначив их как a_1, b_1, a_2 и b_2, соответственно получим:

$$\begin{cases} a_1 \cdot Z_1 = X_1 \\ b_1 \cdot Z_1 = Y_1 \\ a_2 \cdot Z_1 + a_2 \cdot dZ = X_1 + dX \\ b_2 \cdot Z_1 + b_2 \cdot dZ = Y_1 + dY. \end{cases} \quad (7)$$

Решением полученной системы из 4 линейных уравнений будет следующее:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 \\ 0 & -1 & b_1 \\ -1 & 0 & a_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ dX - a_2 \cdot dZ \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} &\Delta = a_2 - a_1, \\ &\Delta_1 = a_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ), \\ &\Delta_2 = b_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ), \\ &\Delta_3 = dX - a_2 \cdot dZ. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда окончательное решение:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{a_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ)}{a_2 - a_1}, \\ Y_1 &= \frac{b_1 \cdot (dX - a_2 \cdot dZ)}{a_2 - a_1}, \\ Z_1 &= \frac{dX - a_2 \cdot dZ}{a_2 - a_1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отметим, что система может оказаться несовместной и не иметь решения в случае, если значения a_1 и a_2 будут равны. В общем случае, если такое произошло, можно вычислить новое решение, используя первое, второе и четвёртое уравнения из системы 7. В этом случае значение главного определителя системы будет равно $b_2 – b_1$. При использовании двух других комбинаций уравнений из системы (7) главный определитель также будет равен одному из двух вышеупомянутых выражений. Это означает, что данный алгоритм не будет корректно работать в случае использования двух фотографий объекта с одной и той же камеры без её перемещения. Также в таком случае попытка использовать трансфокатор не будет успешной, поскольку, перемещая проекцию рассматриваемой точки ближе к краям изображения и увеличивая тем самым абсолютные значения ее координат, аналогично будет увеличиваться и фокусное расстояние камеры, поэтому конечное значение их соотношения останется неизменным.

Для проверки данных ограничений воспользуемся методом Гаусса. Запишем расширенную матрицу системы (7) и, с помощью допустимых в методе Гаусса преобразований, приведем ее к треугольному виду:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ -1 & 0 & a_2 & dX - a_2 \cdot dZ \\ 0 & -1 & b_2 & dY - b_2 \cdot dZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 - a_1 & dX - a_2 \cdot dZ \\ 0 & -1 & b_2 & dY - b_2 \cdot dZ \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 - a_1 & dX - a_2 \cdot dZ \\ 0 & 0 & b_2 - b_1 & dY - b_2 \cdot dZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & -1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dfrac{dX - a_2 \cdot dZ}{a_2 - a_1} \\ 0 & 0 & 1 & \dfrac{dY - b_2 \cdot dZ}{b_2 - b_1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Как видно из полученной в (10) матрицы, ранее сделанный вывод является верным. Кроме того, исходя из структуры данной матрицы можно сделать еще один вывод – поскольку в данной матрице две строки, в которых содержится только Z_1, значение данной переменной может быть вычислено двумя способами. В общем случае может быть использован любой из них. Однако если выполняется одно из двух условий: $dY = dZ = 0$; $dX = dZ = 0$ в результате использования одного из методов решение вырождается в нулевое: $X_1=Y_1=Z_1=0$. Соответственно, при возникновении одного из таких случаев необходимо использовать второй способ, который не приводит к вырождению решения. Также это подтверждает, что данный метод не будет работать при съемке с одной и той же точки. В этом случае к вырождению в нулевое решение приведут оба способа вычисления Z_1.

После получения значений координат объекта нетрудно вычислить расстояние до него от первой камеры с помощью формулы

$$d = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}. \quad (11)$$

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная проверка полученных выражений проводилась с использованием цифровых камер с объективами Helios-44M, Industar-50-2 и Sony Zeiss Vario-Sonnar T. В качестве объекта использовались стандартные калибровочные сетки. Общая схема эксперимента приведена на рис. 2.

Фотосъемка осуществлялась с двух фиксированных точек, обозначенных как A и B. В качестве системы с индексом 1 использовалась система, описывающая камеру, находившуюся в точке A. Таким образом, искомое расстояние до изображения калибровочной сетки P составляет 640 мм, или 0,64 м. Данные о каждом снимке приведены в табл. 1. Результаты работы алгоритма приведены в табл. 2.

По результатам проведения эксперимента можно сделать ряд выводов. Во-первых, существуют явно прослеживающиеся закономерности полученных результатов.

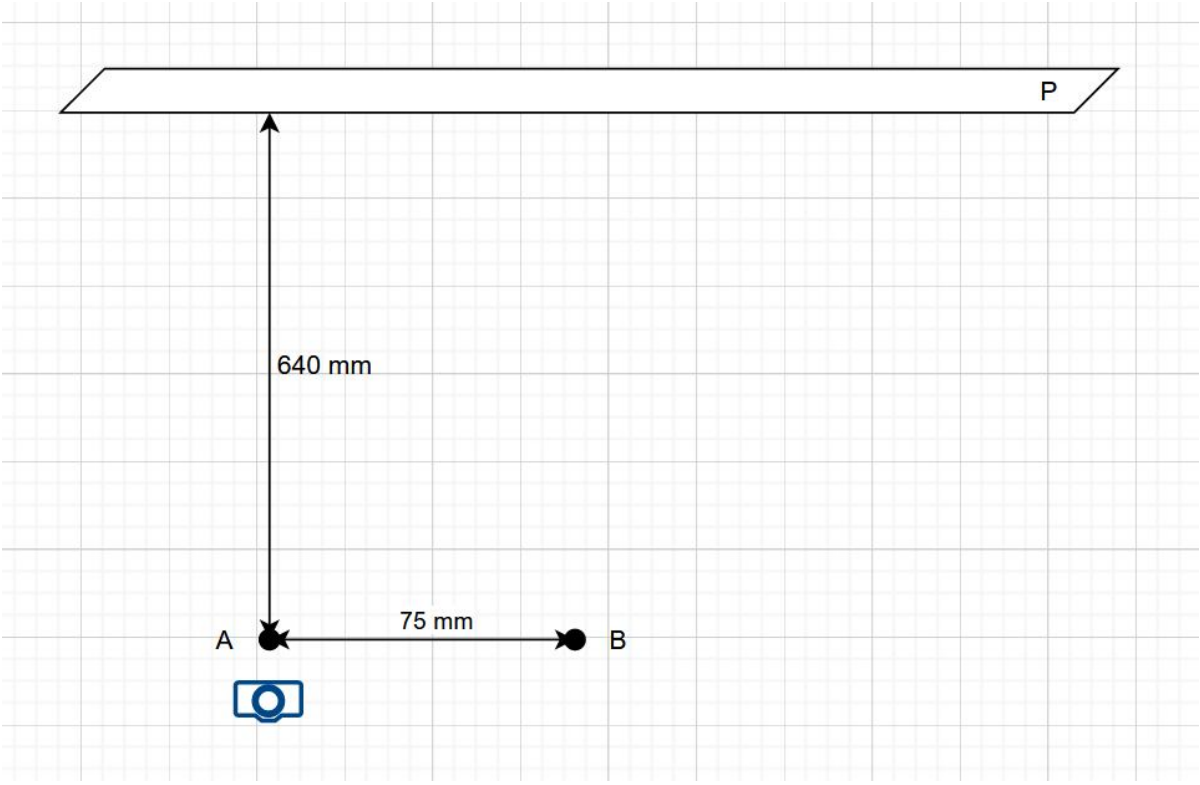

Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Fig. 2. The scheme of the experiment

Таблица 1. Исходные данные для проведения эксперимента

Table 1. The initial data for the experiment

Камера / Camera	Точка / Point	f, мм / f, mm	Координаты выбранной точки на снимке / Coordinates of the selected point on the image	
			x	y
Helios	A	58	3100	2320
Helios	B	58	1651	2320
Industar	A	50	3041	2314
Industar	B	50	1833	2314
Sony Zeiss	A	28	3143	2143
Sony Zeiss	B	28	2427	2143
Sony Zeiss	A	35	3164	2186
Sony Zeiss	B	35	2325	2186
Sony Zeiss	A	85	3122	2443
Sony Zeiss	B	85	1320	2443

Таблица 2. Результаты проведения эксперимента

Table 2. The results of the experiment

Точка А, камера / Point A, camera	Точка В, камера / Point B, camera	Вычисленное расстояние, м / Calculated distance, m
Helios	Helios	0,5081
Helios	Industar	0,5064
Helios	Sony, 28	0,572
Helios	Sony, 35	0,6041
Helios	Sony, 85	0,5907
Industar	Helios	0,5272
Industar	Industar	0,5254
Industar	Sony, 28	0,5964
Industar	Sony, 35	0,6314
Industar	Sony, 85	0,6167
Sony, 28	Helios	0,4476
Sony, 28	Industar	0,4463
Sony, 28	Sony, 28	0,4965
Sony, 28	Sony, 35	0,5205
Sony, 28	Sony, 85	0,5105
Sony, 35	Helios	0,4543
Sony, 35	Industar	0,453
Sony, 35	Sony, 28	0,5048
Sony, 35	Sony, 35	0,5296
Sony, 35	Sony, 85	0,5193
Sony, 85	Helios	0,514
Sony, 85	Industar	0,5123
Sony, 85	Sony, 28	0,5795
Sony, 85	Sony, 35	0,6125
Sony, 85	Sony, 85	0,5987

Так, при использовании снимков из точки В с объективов Helios и Industar результаты были значительно хуже, чем при использовании объектива Sony. Данный результат можно объяснить погрешностью измерения смещения камеры при съемке из точки В с этих объективов (подробнее зависимость результатов от точности измерения исходных параметров будет описана ниже). Аналогичная ситуация наблюдается при использовании объектива Sony с фокусным расстоянием 28 и 35 мм в точке А. Если удалить из результирующей выборки результаты с высокой погрешностью, описанные выше, получаем 9 результатов в диапазоне

от 0,572 м до 0,6314. Таким образом, погрешность вычислений находится в диапазоне от 10% до 1,5%. Во-вторых, все полученные значения строго меньше истинного расстояния (0,64 м), что обусловлено допущениями, используемыми в модели «камера-обскура» и вносимыми ими погрешностями.

Следующим шагом, который необходимо сделать, является оценка чувствительности данного метода к точности измерений. Большинство из параметров, используемых при вычислениях, либо измеряются с высокой точностью, либо берутся из технической документации. Исключением из этого является смещение, которое в большинстве случаев измеряется вручную. Соответственно, необходимо оценить зависимость точности вычислений от точности измерений трех параметров: dX, dY, dZ. Поскольку наглядно изобразить зависимость одной переменной от трех других довольно сложно, были исследованы три зависимости от двух переменных – dX и dY, dX и dZ, dY и dZ. В каждом случае фиксировалось значение одной из трех переменных, а две другие изменялись с шагом 1 мм. После этого на основе вычисленных значений строился 3D-график соответствующей зависимости. В качестве исходных данных использовался эксперимент Industar-Sony 35, как показавший наиболее точный результат. Полученные в ходе работы графики приведены на рис. 3-5.

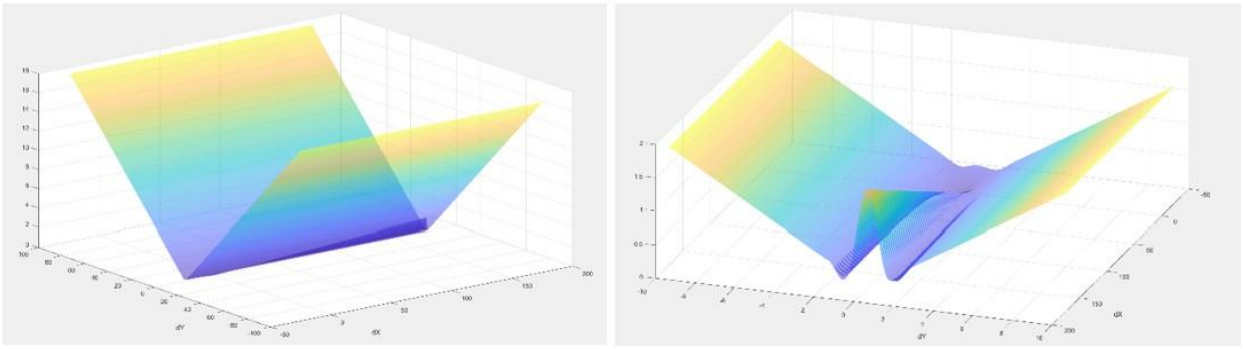

Рис. 3. График зависимости результатов работы метода в зависимости от значения величин dX и dY

Fig. 3. Graph of the dependence of the results of the method depending on the values of dX and dY

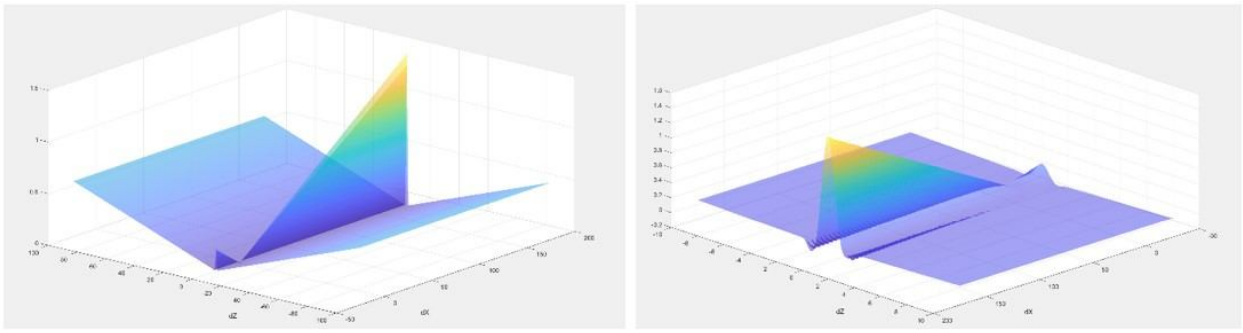

Рис. 4. График зависимости результатов работы метода в зависимости от значения величин dX и dZ

Fig. 4. Graph of the dependence of the results of the method depending on the values of dX and dZ

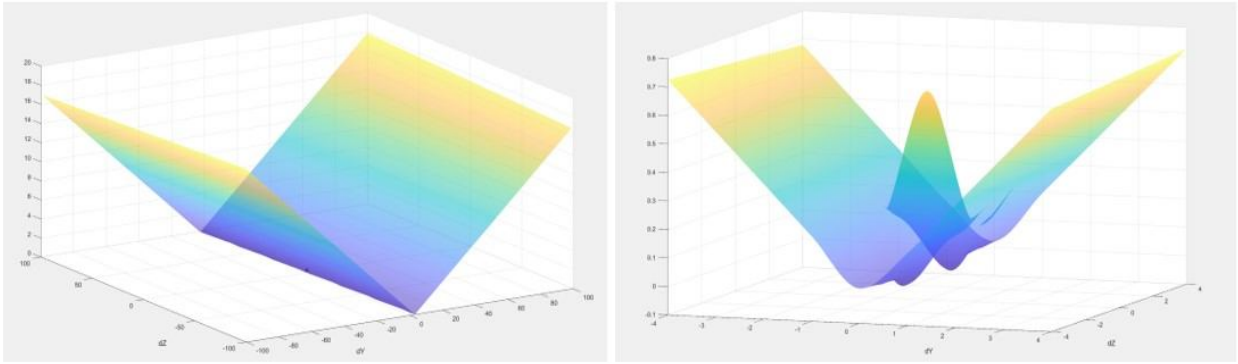

Рис. 5. График зависимости результатов работы метода в зависимости от значения величин dY и dZ

Fig. 5. Graph of the dependence of the results of the method depending on the values of dY and dZ

Как видно, во всех экспериментах наблюдается одинаковая тенденция – результат работы алгоритма изменяется линейно, однако в районе 0 наблюдается «выброс» данных с существенным отклонением результата. Таким образом, для повышения точности работы данного метода рекомендуется использовать такое расположение камер, чтобы значения dX, dY и dZ были отличными от нуля. За счет этого возможно сделать зависимость результата вычисления от точности их измерения более плавной.

Выводы

В данной статье был разработан и протестирован метод определения расстояния до объекта с использованием изображений, полученных с камер с различными оптическими системами, в условиях отсутствия априорной информации о параметрах данного объекта. Результаты показали возможность определения расстояния до объектов для типовых камер с точностью 90% и выше для матриц с размером пиксела 5,94 мкм. Предложенная математическая модель также позволяет измерять линейные размеры самих объектов, используя дистанцию до нескольких граничных точек.

Также было проведено исследование чувствительности разработанного метода к точности измерения величины смещения используемых камер друг относительно друга. Исследование показало, что для получения более точных результатов необходимо обеспечить такое расположение камер, чтобы их смещение относительно друг друга было ненулевым во всех трех плоскостях. Данный вывод также объясняет большой разброс результатов работы метода в описанном в статье эксперименте, поскольку в его рамках камеры были расположены таким образом, что отличным от нуля было только смещение d*X*. Изменение расположения позволит добиться погрешности менее чем полученные в ходе эксперимента 10%.

В качестве путей улучшения данного метода можно отметить возможность введения в рассматриваемую модель оценку нелинейных искажений изображений, в первую очередь дисторсии. Это поможет

повысить точность измерения расстояния описанным методом. Кроме того, данное улучшение позволит использовать камеры с любыми объективами, тогда как актуальная версия метода подразумевает отсутствие на изображениях значительных искажений, ввиду чего при использовании камер с искажающими объективами, например, типа «рыбий глаз», будет наблюдаться высокая погрешность вычисления результата. Также в дальнейших исследованиях планируется решить задачу измерения геометрических характеристик изображений, используя одну камеру с одним объективом, имеющим выраженные нелинейные искажения.

Список литературы

1. Гурьянов И.С., Кайсина И.А. Перспективы применения стереозрения в БПЛА // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: в 4 т. СПб., 2023. Т. 1. С. 376–381.

2. Khachatryan T.B. A review of visual odometry for UAV autonomous navigation // Вестник Национального Политехнического университета Армении. Информационные технологии, электроника, радиотехника. 2023. № 1. С. 9–17. https://doi.org/10.53297/18293336-2023.1-9.

3. Коновалов К.Д., Кулешов С.В. Общая структура системы визуальной навигации БПЛА по видеоданным // Труды 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб., 2023. С.274-276.

4. Коновалов К.Д. Алгоритм планирования маршрута БПЛА в условиях недостатка визуальных ориентриров // Системы анализа и обработки данных. 2024. №2(94). С. 37-54. https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-37-54

5. Чувагина С.Я. Определение расстояний между объектами на цифровой фотографии // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 7 (135). URL: https://web.snauka.ru/issues/2022/07/98652.

6. Кулешов С.В., Аксенов А.Ю. Зайцева А.А. О подходе к построению программно-определяемой камеры (обзор) // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, №3. С. 44–49.

7. Кулешов С.В., Аксенов А.Ю. Зайцева А.А. Подход к идентификации источника снимков с цифровых камер // Инновационная наука. 2015. № 12-2. С. 82–86.

8. Александров А.А., Максимов А.Н. Метод измерения диаметра изделий с помощью стереозрения при их изготовлении на токарном станке // Мягкие измерения и вычисления. 2024. № 5 (78). С. 5–14. https://doi.org/10.36871/2618-9976.2024.05.001.

9. Laser Distance Measurement by using web camera / A. A. Hamad, D. A. Dhahir, B. R. Mhdi, W. H. Salim // IOSR Journal of Engineering. 2014. Vol. 4, no. 4. P. 25-28.

10. Lee J.M., Hwang K., Jung I.H. Real distance measurement using object detection of artificial intelligence // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. 2021. Vol. 12, № 6. P. 557-563. https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i6.1979.

11. Aung Y.Y., Lwin M.M. Real-time object distance estimation based on YOLOv8 using webcam // 2024 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA), Yangon, Myanmar. 2024. P. 1-6. https://doi.org/10.1109/ICCA62361.2024.10532829.

12. Saponara S., Elhanashi A., Gagliardi A. Implementing a real-time, AI-based, people detection and social distancing measuring system for Covid-19 // Journal of Real-Time Image Processing. 2021. Vol. 18, № 3. P. 1937-1947. https://doi.org/10.1007/s11554-021-01070-6.

13. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №11 (23). С. 1–10. https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-11-996.

14. Жиляков П. В., Скороход Б.А. Оценка точности (погрешности) в измерения расстояния до объекта по стереоизображениям // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника-2019: материалы V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Севастополь, 2019. С. 10-15.

15. Чумак А.В., Щербакова Е.А. Алгоритм измерения расстояния до объекта при помощи метода стереоскопического зрения // Студенческий вестник. 2023. № 20 (259). С. 42–45.

16. Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision, A Modern Approach. 2-nd ed. Cambridge: Pearson, 2012. 800 p.

References

1. Guryanov I.S., Kaisina I.A. Prospects for the use of stereo vision in UAVs. In: *Aktual'nye problemy infotelekommunikacij v nauke i obrazovanii. Sbornik nauchnyh statei. XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferenciya. V 4 t. = Actual problems of infotelec communications in science and education. Collection of scientific articles. XII International Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference. In 4 vol.* St. Petersburg; 2023. 1:376–381. (In Russ.)

2. Khachatryan T.B. A review of visual odometry for UAV autonomous navigation. *Vestnik Natsional'nogo Politekhnicheskogo universiteta Armenii. Informatsionnyye tekhnologii, elektronika, radio-tekhnika = Bulletin of National Polytechnic University of Armenia. Information technology, electronics, radio engineering.* 2023. (1): 9–17. (In Russ.) https://doi.org/10.53297/18293336-2023.1-9.

3. Konovalov K.D., Kuleshov S.V. General structure of the UAV visual navigation system based on video data. In: *Trudy 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika» = Proceedings of the 34th International Scientific and Technical Conference «Extreme Robotics»*. St. Petersburg; 2023. P. 456–460. (In Russ.)

4. Konovalov K.D. An algorithm for planning the UAV route in conditions of a lack of visual landmarks. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2024. (2): 37–54. (In Russ.). https://doi.org/10.17212/2782-2001-2024-2-37-54.

5. Chuvagina S.Y. Determining the distances between objects in a digital photograph. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii = Modern scientific research and innovation.* 2022; (7). (In Russ.). Available at: https://web.snauka.ru/issues/2022/07/98652.

6. Kuleshov S.V., Aksenov A.Y., Zaytseva A.A. An approach to the software defined camera creation (review). *Nauchnoe priborostroenie = Scientific instrumentation*. 2016; 26(3): 44–49. (In Russ.)

7. Kuleshov S.V., Aksenov A.Y., Zaytseva A.A. An approach to identifying the source of digital camera images. *Innovacionnaya nauka = Innovative science.* 2015; (12-2): 82–86. (In Russ.)

8. Aleksandrov A.A., Maksimov A.N. Method of measuring the diameter of lathe manufactured products with stereovision. *Myagkie izmereniya i vychisleniya = Soft measurements and calculations.* 2024; (5): 5–14. (In Russ.). https://doi.org/10.36871/2618-9976.2024.05.001.

9. Hamad A. A., Dhahir D. A., Mhdi B. R., Salim W. H. Laser Distance Measurement by using web camera. *IOSR Journal of Engineering.* 2014; 4(4): 25-28.

10. Lee J.M., Hwang K., Jung I.H. Real distance measurement using object detection of artificial intelligence. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education.* 2021; 12(6): 557-563. https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i6.1979.

11. Aung Y.Y., Lwin M.M. Real-time object distance estimation based on YOLOv8 using webcam. In: *2024 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA), Yangon, Myanmar.* 2024. P. 1-6. https://doi.org/10.1109/ICCA62361.2024.10532829.

12. Saponara S., Elhanashi A., Gagliardi A. Implementing a real-time, AI-based, people detection and social distancing measuring system for Covid-19. *Journal of Real-Time Image Processing.* 2021; 18(3): 1937-1947. https://doi.org/10.1007/s11554-021-01070-6.

13. Loktev D.A., Alfimtsev A.N. Measuring the distance to a moving object using a comprehensive video monitoring system. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii = Engineering Journal: Science and Innovation.* 2013; (11): 1–10. (In Russ.). https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-11-996.

14. Zhilyakov P.V., Skorokhod B.A. Estimation of accuracy (error) in measuring the distance to an object from stereo images. In: *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mek-*

hatronika-2019: Materialy V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov = Intelligent systems, control and mechatronics-2019: Proceedings of the V All-Russian scientific and technical conference of young scientists, postgraduates and students. Sevastopol; 2019. P. 10-15. (In Russ.)

15. Chumak A.V., Shcherbakova E.A. An algorithm for measuring the distance to an object using stereoscopic vision. *Studencheskij vestnik = Student Bulletin.* 2023; (20): 42–45. (In Russ.)

16. Forsyth D.A., Ponce J. Computer Vision, A Modern Approach. 2-nd ed. Cambridge: Pearson; 2012. 800 p.

Информация об авторе / Information about the Author

Коновалов Константин Дмитриевич, аспирант, лаборатория автоматизации научных исследований Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kodmko@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0009-0000-6968-7283

Konstantin D. Konovalov, Post-Graduate Student, Laboratory of Scientific Research Automation, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: kodmko@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0009-0000-6968-7283