

Методы навигации по данным аэроландшафта для малых БЛА

А. П. Мирошниченко¹✉, И. Е. Мухин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: alexnofoget@gmail.com

Резюме

Цель исследования. БПЛА получили широкое распространение в таких сферах деятельности, как военная, разведывательная, исследовательская. Как следствие, остро стоит вопрос их применения в условиях радиоэлектронной борьбы, наличия различных помех как техногенного характера, так и естественного. Таким образом, возрастает необходимость навигации БПЛА по визуальным данным.

Цель – исследование основных негативных факторов, влияющих на качество изображений аэрофотосъемки, и методов их устранения для построения корректного ортофотоплана для визуальной навигации БПЛА.

Методы. Предложены математические методы для устранения негативных искажений на снимках камеры БПЛА с помощью различных подходов трансформации изображений. После применения этих методов к исходным изображениям получают исправленные версии, используемые для построения тайлового покрытия. Тайловое покрытие, созданное на основе обработанных снимков, обеспечивает непрерывное и единое покрытие территории, собранное во время полета БПЛА. Это позволяет получать точные координаты снимков и объектов на них.

Результаты – анализ основных методов устранения негативных факторов, искажающих изображения при аэрофотосъемке для визуальной навигации БПЛА, а также краткий обзор самих методов визуальной навигации.

Заключение. Для успешной реализации визуальной навигации БПЛА необходимо применить ряд методов по преобразованию изображений аэрофотосъемки, а также применение определенных алгоритмов для визуальной навигации. Сделан вывод, что помимо применения математических и программных алгоритмов также потребуется анализ и исследование необходимых вычислительных мощностей для применения всего аппаратно-программного комплекса на борту БПЛА с учетом его массогабаритных свойств.

Ключевые слова: ортофотоплан; тайловое покрытие; БПЛА; БЛА; малые БЛА; навигация БПЛА; визуальная навигация БПЛА; дисторсия; коррекция изображений; перспективные искажения; проективные искажения; ориентация по сторонам света; проективная трансформация.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Мирошниченко А. П., Мухин И. Е. Методы навигации по данным аэроландшафта для малых БЛА // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 14, № 3. С. 144–156. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-144-156>

Поступила в редакцию 10.07.2024

Подписана в печать 08.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Navigation methods using airlandscape data for small UAVs

Aleksey P. Miroshnichenko¹✉, Ivan E. Mukhin¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: alexnofoget@gmail.com

Abstract

The purpose of the research. UAVs are widely used in such fields as military, intelligence, and research. As a result, the issue of their use in electronic warfare conditions and the presence of various interference, both man-made and natural, is acute. Thus, the need for UAV navigation using visual data increases.

The purpose is study of the main negative factors affecting the quality of aerial photography images and methods for eliminating them to construct a correct orthomosaic for UAV visual navigation.

Methods. Mathematical methods are proposed to eliminate negative distortions in UAV camera images using various image transformation approaches. After applying these methods to the original images, corrected versions are obtained, which are used to construct the tile covering. Tiled coverage created from processed images provides continuous and uniform coverage of the area collected during the UAV's flight. This allows you to obtain exact coordinates of images and objects on them.

Results. An analysis of the main methods for eliminating negative factors that distort images during aerial photography for the visual navigation of UAVs, as well as a brief overview of the visual navigation methods themselves.

Conclusion. To successfully implement visual navigation of a UAV, it is necessary to apply a number of methods for converting aerial photography images, as well as the use of certain algorithms for visual navigation. It is concluded that in addition to the use of mathematical and software algorithms, it will also be necessary to analyze and study the necessary computing power for the use of the entire hardware and software complex on board the UAV, taking into account its weight-dimensional properties.

Keywords: orthomosaic; tile covering; UAV; small UAV; UAV navigation; UAV visual navigation; distortion; image correction; perspective distortion; projective distortion; orientation to cardinal directions; projective transformation.

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

For citation: Miroshnichenko A.P., Mukhin I.E. Navigation methods using airlandscape data for small UAVs. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2024;14(3):144–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-144-156>

Received 10.07.2024

Accepted 08.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Визуальная навигация на малых беспилотных летательных аппаратах (БЛА) является одним из наиболее эффективных способов навигации в условиях, когда использование GPS-навигации невозможно или затруднено. Основным методом такой навигации является метод получения снимков с борта БЛА с определенной дискретностью во времени и цифровая обработка на борту с целью получения текущих координат. Рассмотрим ряд основных проблем, а также необходимые и достаточные условия для осуществления визуальной навигации в условиях ограничений на массогабаритные характеристики и вычислительную мощность на борту.

Одной из основных проблем навигации малых БЛА по визуальным данным является наличие оптической дисторсии, которая возникает как искажение изображения (абберации), вызванное несовершенствами оптической системы, такими как искривление линий и форм, изменение размеров объектов или дисторсия цвета. Это может происходить при использовании объективов с низким качеством оптики или при работе с широкоугольными объективами. Оптическая дисторсия может быть исправлена с помощью специальных программных инструментов или при помощи корректирующих элементов в оптической системе.

Также при крене и тангаже малого БЛА возникают перспективные искажения, которые происходят, когда плоскость изображения и плоскость предмета не параллельны между собой [1], т. е. изменения размеров и форм объектов на изображении в зависимости от их

расположения в пространстве и расстояния до камеры. Например, объекты, находящиеся ближе к камере, будут выглядеть больше, чем объекты, находящиеся дальше. Это может привести к искажению формы объектов или к искажению пропорций на изображении. Для исправления подобных искажений используются специальные алгоритмы, которые могут быть ресурсоемкими и требовать высокой вычислительной мощности.

Для эффективной навигации малых БЛА по визуальным данным необходимо иметь информацию о своей ориентации по сторонам света. Для решения этой проблемы нужно иметь доступ к данным о начальных координатах, азимуте полета, можно использовать дополнительные сенсоры, такие как гироскопы, акселерометры или электронный компас. Ориентироваться по сторонам света может помочь наличие алгоритмов сопоставления аэрофотоплана с камеры БЛА и предварительно загруженной спутниковой карты местности.

Материалы и методы

Проективная трансформация изображений – это математический процесс, при котором изображение преобразуется в другое изображение с помощью матрицы преобразования. Это преобразование может быть использовано для изменения размера, поворота, перспективы или искажения изображения. Проективная трансформация может быть использована для совмещения двух изображений, создания панорамных изображений или для коррекции искажений в изображении, вызванных перспективой при фототрафировании объектов на расстоянии.

Проективная трансформация может быть выполнена с помощью различных алгоритмов, таких как аффинное преобразование, гомографическое преобразование или метод RANSAC. Она широко используется в обработке изображений, компьютерном зрении, робототехнике и других областях, где требуется обработка изображений и визуальный анализ.

Далее подробнее рассмотрим перечисленные проблемы и возможные методы их решения

Дисторсия камеры является распространенной проблемой в области машинного зрения, особенно при использовании широкоугольных объективов. Дисторсия может быть вызвана различными факторами, такими как неточности в оптической системе камеры, а также искажениями изображения, происходящими при процессе его захвата. Борьба с дисторсией камеры для машинного зрения обычно включает в себя несколько методов:

1. *Калибровка камеры.* Это процесс определения параметров дисторсии камеры и их компенсации [2]. Обычно это включает в себя использование калибровочной сцены [3] или шаблона с известными геометрическими характеристиками для определения параметров дисторсии [4]. Методом коррекции может являться калибровка камеры с помощью так называемой Zhang's Camera Calibration Algorithm [5], где в качестве основного шаблона используется шахматная доска. Аналогичный подход используется для автоматической калибровки камер с помощью калибровочного стенда со светоотражающими метками [6].

2. *Использование методов компенсации суммарной дисторсии* [7]. После

того как параметры дисторсии камеры определены, можно использовать различные методы для компенсации этой дисторсии. Это может включать в себя применение математических моделей, таких как модель дисторсии «радиальный дисторсионный коэффициент» или «тангенциальный дисторсионный коэффициент» [8], для исправления искажений в изображении.

3. *Использование специализированных алгоритмов обработки изображений.* Существуют различные алгоритмы обработки изображений, которые могут помочь в уменьшении влияния дисторсии камеры на изображение. Это может включать в себя методы интерполяции, рассчитанные специально для устранения дисторсии [9].

4. *Использование корректирующего оборудования.* В некоторых случаях можно использовать специализированное оборудование, такое как оптические фильтры или линзы, для уменьшения дисторсии камеры непосредственно на уровне аппаратного обеспечения.

5. *Обучение нейронных сетей на компенсацию дисторсии.* Нейронные сети могут быть обучены для автоматической компенсации дисторсии камеры на этапе обработки изображений. Это может быть особенно полезно в случаях, когда форма дисторсии сложна или изменчива [10].

Калибровка камеры – это процесс определения внутренних и внешних параметров камеры, таких как фокусное расстояние, коэффициенты дисторсии и матрица камеры.

Метод Zhang's Camera Calibration [5] основан на использовании калибровочной доски, на которой располагаются

известные маркеры (обычно шахматная доска). Пусть (X, Y, Z) – координаты точек на калибровочной доске в мировой системе координат, а (u, v) – соответствующие координаты на изображении в пикселях. Тогда внутренние параметры камеры могут быть выражены следующим образом.

Модель проекции камеры описывается так:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

где (f_x, f_y) – фокусные расстояния камеры по осям x и y соответственно; (c_x, c_y) – оптический центр камеры; (r_{ij}) – элементы матрицы вращения, а (t_x, t_y, t_z) – вектор трансляции камеры.

Модель дисторсии, которая учитывает искажения, вызванные оптическими элементами камеры, описывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x_{уд} \\ y_{уд} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix},$$

где $(x_{уд}, y_{уд})$ – скорректированные координаты после дисторсии; (x, y) – исходные координаты на изображении $r^2 = x^2 + y^2$, а k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 – коэффициенты дисторсии.

Далее, используя скорректированные координаты, возможно произвести трансформацию изображения для устранения искажений и получить изображение с исправленной дисторсией на борту БЛА

Рассмотрим корректировку перспективных искажений, возникающих при крене и тангаже малых БЛА.

Перспективные искажения в изображениях аэрофотоландшафтов возникают в случае, когда камера на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) направлена не над поверхностью, а под некоторым углом к ней. Для коррекции таких искажений применяется методика, включающая использование виртуальной камеры, которая позиционируется с учетом требований аэрофотосъемки.

В представленном подходе изображение получается с реальной камеры, после чего необходимо определить элементы матрицы трансформации, которая позволит трансформировать изображение с реальной камеры в изображение, которое могло бы быть получено виртуальной камерой (рис. 1).

В статье [11] рассматривается более сложный случай, учитывающий крен, тангаж, угол скольжения БПЛА, различную ориентацию камеры относительно БПЛА, а также наклон поверхности аэроландшафта. В реализованном алгоритме сделаны некоторые упрощения: направление камеры строго вниз относительно корпуса БПЛА, верхний край изображения выровнен с направлением полета БПЛА, и поверхность аэрофотоландшафта считается строго горизонтальной. Эти упрощения сделаны из-за их отсутствия в исходных данных, но при необходимости их можно учесть.

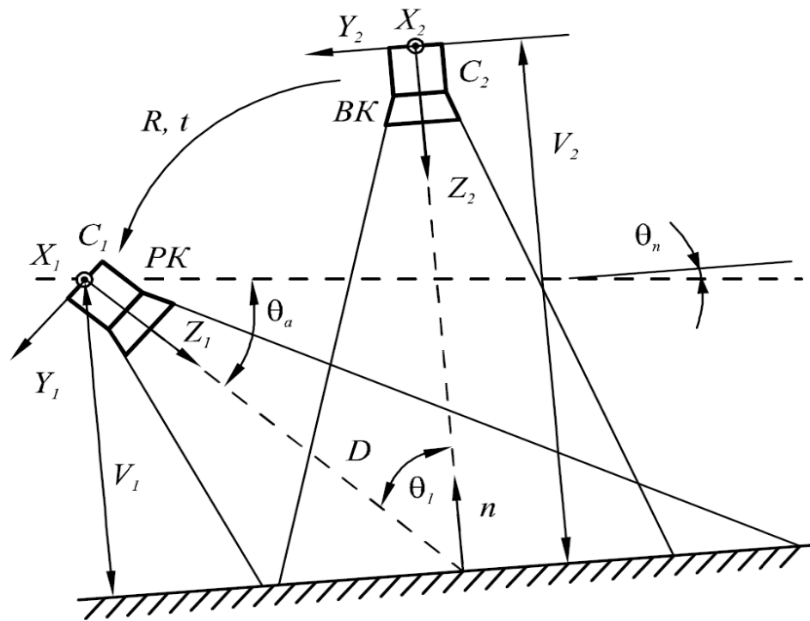


Рис. 1. Взаимное расположение реальной и виртуальной камер [5]

Fig. 1. Mutual arrangement of real and virtual cameras [5]

Пусть высота БПЛА составляет H , а углы крена, тангажа и рыскания обозначаются как a_x , a_z и a_y соответственно. Угол рыскания может использоваться для ориентации изображения по сторонам света. Размеры изображения W и H , а фокусное расстояние объектива камеры – f .

Необходимо определить элементы матрицы трансформации M_{pr} , которая исправляет перспективные искажения и ориентирует камеру по сторонам света.

Виртуальная камера размещается на высоте H_v , равной расстоянию от реальной фотокамеры до центра полученного изображения вдоль наклонного луча визирования (примем $Z_1 = Z_2$). Высота H_v вычисляется по формуле

$$H_v = \frac{H}{\cos a_x \cdot \cos a_z}$$

Матрица внутренних параметров виртуальной камеры будет иметь те же параметры, что и реальная камера:

$$M_v = \begin{pmatrix} \frac{H_v}{f} & 1 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{H_v}{f} & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Кватернион поворота оптической оси камеры вычисляется по формуле

$$q = \sin \frac{a_z}{2} \cdot \cos \frac{a_x}{2}, \cos \frac{a_z}{2} \cdot \cos \frac{a_x}{2} + i, \\ \cos \frac{a_z}{2} \cdot \sin \frac{a_x}{2} + j, \sin \frac{a_z}{2} \cdot \sin \frac{a_x}{2} + k.$$

В соответствии с формулами для параметров Родрига – Гамильтона от элементов кватерниона можно перейти к матрице поворота:

$$R = \begin{pmatrix} 1 - 2q_j^2 - 2q_k^2 & 2(q_i \cdot q_j - q \cdot q_k) & 2(q_i \cdot q_k + q \cdot q_j) \\ 2(q_i \cdot q_j + q \cdot q_k) & 1 - 2q_i^2 - 2q_k^2 & 2(q_j \cdot q_k - q \cdot q_i) \\ 2(q_i \cdot q_k - q \cdot q_j) & 2(q_i \cdot q_k + q \cdot q_i) & 1 - 2q_i^2 - 2q_j^2 \end{pmatrix}$$

Координаты точки начала системы координат реальной камеры в системе координат виртуальной камеры будут

$$C_1 = (0, H \tan t_1, H_{vk} - H)^T,$$

где

$$t_1 = \arctan 2(q \cdot q_i - q_j \cdot q_k, q^2 + q_j^2 - 0,5).$$

По оцененным R и C_1 вычисляется вектор трансляции:

$$T = -R \cdot C_1.$$

Так как в допущениях принято, что наблюдаемая поверхность горизонтальна, то вектор нормали к ней примем $n = (0, 0, -1)^T$. Тогда искомая матрица пример вид

$$M_{pr} = M_v \cdot \left(R - \frac{T^T \cdot n}{H_v} \right) \cdot M_v^{-1}.$$

Полученная матрица M_{pr} предназначена для исправления перспективных искажений.

Ориентация изображения по сторонам света по углу рыскания является процессом определения ориентации изображения, полученного с камеры на (БПЛА), относительно географических направлений (север, юг, восток, запад) с использованием информации об угле рыскания (yaw angle) аппарата.

Угол рыскания определяет направление, в котором БПЛА направлен относительно горизонтальной плоскости и, следовательно, в каком направлении направлен его нос.

В общем случае устанавливается нормальная система координат $OX_g Y_g Z_g$, причем ее начало совпадает с центром масс беспилотного

летательного аппарата. Ось OX_g направлена вверх, соответствуя местной вертикали, а плоскость $OY_g Z_g$ формирует местную горизонтальную плоскость, проходящую через точку O перпендикулярно оси OY_g . Оси OY_g и OZ_g параллельны осям $O_0 X_g$ и $O_0 Z_g$ нормальной земной системы координат, образуя правую прямоугольную систему координат вместе с осью OY_g .

Тогда угол рыскания φ – угол между осью OX_g нормальной системы координат и проекцией продольной оси OX связанной системы координат на горизонтальную плоскость $OX_g Z_g$ нормальной системы координат [12].

Поворот изображения выполняется с помощью евклидовых преобразований уже после исправления искажения от дисторсии камеры и перспективных искажений, когда требуются лишь преобразования сдвига и поворота. Математически расчеты в векторно-матричной форме выглядят так [13]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

с матрицей поворота на угол φ вида

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

и вектором сдвига $t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$

Уравнение можно преобразовать для однородной системы координат в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & t_x \\ \sin \varphi & \cos \varphi & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Далее, например, можно рассчитать координаты точки вращения с помощью транслятора сдвига:

$$t_x = -x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi + x,$$

$$t_y = -x \cdot \sin \varphi - y \cdot \cos \varphi + y.$$

Проективные преобразования изображений – это математические операции, которые изменяют форму и расположение объектов на изображении, сохраняя при этом их относительные пропорции и геометрические свойства. С геометрической точки зрения проективное преобразование – это обратимое преобразование проективной плоскости (или пространства), которое переводит прямые в прямые без сохранения параллельности линий [14].

Таблица 1. Типы аффинных преобразований

Table 1. Types of affine transformations

Тип	Матрица T
Растяжение	$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Поворот	$\begin{pmatrix} \cos(a) & \sin(a) & 0 \\ -\sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Перенос	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & S_x \\ 0 & 1 & S_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

В общем случае проективные преобразования можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ w \end{pmatrix}$$

При представлении в обычных координатах, что соотношение (выше) будет иметь нелинейный вид, связанный с перенормировкой:

Проективные преобразования часто представляются с помощью проективных матриц, которые определяют, как точки из одной системы координат переходят в другую систему координат. Эти матрицы могут быть определены на основе известных соответствий точек на исходном и преобразованном изображениях.

В качестве проективных преобразований можно использовать аффинные и евклидовы преобразования [14], т. к. в аналитической геометрии аффинная группа является подгруппой общей линейной (проективной) группы, а евклидова группа – частным случаем аффинной группы преобразований (табл. 1).

$$x' = \frac{t_{11}x + t_{12}y + t_{13}}{t_{31}x + t_{32}y + t_{33}},$$

$$y' = \frac{t_{21}x + t_{22}y + t_{23}}{t_{31}x + t_{32}y + t_{33}}.$$

Проективные преобразования применяются, если изображение аэроландшафта с перспективными искажениями нужно привести к плановому.

Перенос изображения в мировой системе координат для сшивки изображений

является финальным шагом для алгоритма навигации малого БЛА.

Результаты и их обсуждение

В результате исследования установлены основные искажения, характерные для съемки с борта БПЛА с использованием цифровой камеры. Использование вышеописанных методов позволяет преобразовать изображения и сшить их в единое пространство, затем построить тайловое покрытие, которое можно привязать к мировой системе координат для дальнейшей навигации БЛА. Результат построения подобного тайлового покрытия обычно называется ортофотопланом, который позволяет осуществить геопривязку изображений с сантиметровой точностью [15].

Тайловое покрытие (Tile-Based Mapping) – это метод разбиения большой

области или изображения на более мелкие участки, называемые тайлами, которые затем могут быть использованы для создания общей карты или изображения [16]. Этот метод часто используется для создания больших карт, изображений высокого разрешения или текстурных покрытий для построения ортофотоплана [17].

Тайлы выстраиваются рядом друг с другом, создавая впечатление единого изображения. Каждый тайл имеет размер, например, 256×256 пикселей. Тайлы располагаются бок о бок, образуя единое поле (рис. 2). Каждый тайл имеет свои координаты расположения. На сегодняшний день нет универсальной системы координат для тайлов. Различные геоинформационные сервисы используют наиболее удобные схемы расположения тайлов в своих алгоритмах [18].

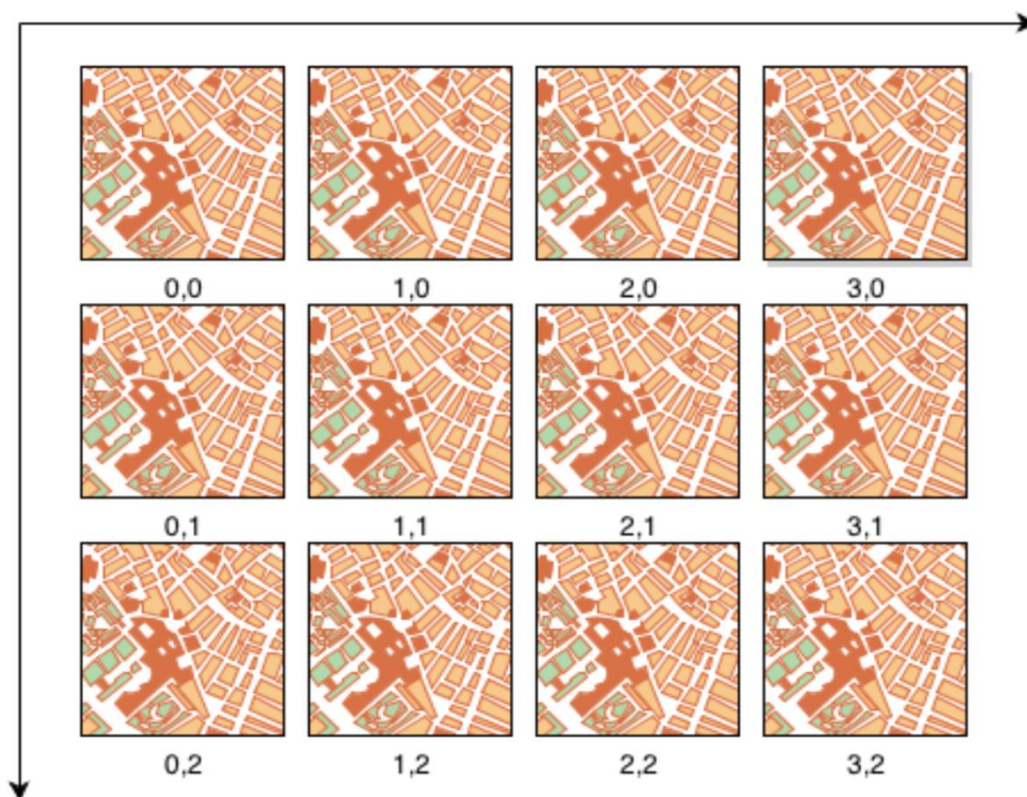


Рис. 2. Схема нумерации тайлов

Fig. 2. Tile numbering scheme

Левый верхний тайл имеет координаты (0, 0). Напомним, что в изображениях оси направлены: ось x – вправо, а y – вниз. Тогда координаты пиксел внутри тайлового покрытия и внутри ортофотоплана будут связаны следующими соотношениями:

$$t_p = 256T + t_T.$$

Это позволяет легко вычислять пиксельные координаты ортофотоплана по координатам тайла T и координатам пиксела внутри тайла t_T и наоборот:

$$T = \text{round} \frac{t_p}{256},$$

$$t_T = t_p - 256T,$$

где round – функция округления до целого в меньшую сторону.

Очевидно, что если системы координат ортофотоплана и тайлового покрытия совпадают, то вычисление географических координат по тайловому покрытию можно производить с той же матрицей перехода M_g .

Далее, имея либо стартовые координаты полета, например координаты первого тайла, привязанные к мировой системе координат, либо с помощью алгоритмов сопоставления заранее загруженных изображений с известными координатами опорных точек, можно определить координаты каждого отдельного тайла или объекта на нем [19].

Выводы

Для реализации предложенных математических методов необходимы серьезные вычислительные мощности.

Обработка каждого изображения, которая осуществляется попиксельно, требует значительных вычислительных ресурсов, особенно если необходима трансформация в реальном времени в процессе движения БПЛА. Так скорость малого аппарата может варьироваться в пределах от 80 км/ч до 300 км/ч в среднем. В зависимости от высоты полета обработку каждого снимка аэрофотосъемки нужно осуществлять в достаточно короткие промежутки времени для построения качественного тайлового покрытия. Кроме того, каждый негативный фактор требует отдельного алгоритма и обработки изображения, что также усложняет вычисления.

Успешная навигация по данным аэрофотосъемки и получение точных координат снимков требуют предварительной обработки изображений с использованием математических методов, построение тайлового покрытия, а также значительных вычислительных ресурсов для обеспечения точности и эффективности навигации. Вследствие того, что малые БЛА сильно ограничены по массе полезного груза из-за своих массогабаритных характеристик, требуются дальнейшие исследования для поиска и подбора соответствующей вычислительной техники и оптимизации производительности описанных выше методов и алгоритмов под вычислительные мощности данной техники.

Список литературы

1. Степанов Д. Н. Математические модели получения стереоизображений с двухзеркальных катадиоптрических систем с учётом дисторсии объективов // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 1. С. 105–114.
2. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2014. № 2. С. 71–80.
3. Zhang Yu-Jin. Camera Calibration // 3-D Computer Vision. Springer, 2023. P. 37–65.
4. Ramalingam S., Sturm P. A Unifying Model for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. Vol. 39, is. 7. P. 1309–1319.
5. Camera calibration using multiple unordered coplanar chessboards / L. Grammatikopoulos, K. Adam, E. Petsa, G. Karras // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Strasbourg, France, 2019. Vol. XLII-2/W18. P. 59–66.
6. Автоматическая калибровка системы видеокамер и лидаров для автономных мобильных комплексов / Ю. Б. Блохинов, Е. Э. Андриенко, К. К. Казахмедов, Б. В. Вишняков // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 3. С. 382–393.
7. Жимбуева Л. Д., Дамдинова Т. Ц. Исследование факторов, влияющих на дисторсию оптических систем цифровых камер // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2015. Т. 53, № 2. С. 38–42.
8. Глаголев В. М. Описание и программное устранение дисторсии объективов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 9, ч. 2. С. 188–194.
9. Холопов И. С. Алгоритм упрощенной компенсации дисторсии при проецировании видеоизображения на асферические отображающие поверхности априорно неизвестной формы // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 3. С. 57–61.
10. Rong J., Huang S., Shang Z., Ying X. Radial Lens Distortion Correction Using Convolutional Neural Networks Trained with Synthesized Images // Computer Vision – ACCV. 13th Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, November 20–24. Springer, 2016. P. 35–49.
11. Холопов И. С. Алгоритм коррекции проективных искажений при маловысотной съёмке // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 2. С. 284–290.
12. Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А. Управление угловым положением летательного аппарата // Автометрия. 2015. Т. 51, № 5. С. 35–41.
13. Алпатов Б. А., Ершов М. Д., Фельдман А. Б. Алгоритм обработки изображений для системы комбинированного видения летательного аппарата // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 8–14.
14. Белов Ю. С., Рыбкин С. В. Математические модели геометрических преобразований изображений в задаче анализа видеопоследовательностей // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2015. № 3. С. 15–24.
15. Захлебин А. С. Методика построения ортофотопланов местности с помощью беспилотного квадрокоптера, оснащенного навигационным геодезическим приемником // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24, № 3. С. 44–49.

16. An accurate real-time uav mapping solution for the generation of orthomosaics and surface models / A. Kern, P. Fanta-Jende, P. Glira, F. Bruckmüller, C. Sulzbachner // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Strasburg, France, 2021. Vol. XLIII-B1. P. 165–171.
17. Tanathong S., Smith A. P., Remde S. SurfaceView: Seamless and Tile-Based Orthomosaics Using Millions of Street-Level Images From Vehicle-Mounted Cameras // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. Vol. 23, is. 4. P. 3482–3497.
18. Gómez-Candón D., De Castro A. I., Lopez-Granados F. The accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat // Precision Agriculture. 2014. Vol. 15. P. 44–56.
19. Pagliari D., Pinto L., Sona G. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images // Earth. Sci. Inform. 2014. Vol. 7. P. 97–107.

References

1. Stepanov D.N. Mathematical models for obtaining stereo images from two-mirror catadioptric systems taking into account lens distortion. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2019;43(1):105–114. (In Russ.)
2. Nikitin V.N., Semencov A.V. Calibration of cameras based on images of a flat test object. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka = Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*. 2014;(2):71–80. (In Russ.)
3. Zhang Yu-Jin. Camera Calibration. In: 3-D Computer Vision. Springer; 2023. P. 37–65.
4. Ramalingam S., Sturm P.A Unifying Model for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017;39(7):1309–1319.
5. Grammatikopoulos L., Adam K., Petsa E., Karras G. Camera calibration using multiple unordered coplanar chessboards. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Optical 3D Metrology. Vol. XLII-2/W18. Strasbourg, France; 2019. P. 59–66.
6. Blokhinov Yu.B., Andrienko E.E., Kazakhmedov K.K., Vishnyakov B.V. Automatic calibration of video camera and lidar systems for autonomous mobile systems. *Computernaya Optika = Computer Optics*. 2021;45(3):382–393. (In Russ.)
7. Zhimbueva L.D., Damdinova T.C. Issledovanie faktorov, vliyayushchih na distorsiyu opticheskikh sistem cifrovyyh kamer. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya = Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management*. 2015;53(2):38–42. (In Russ.)
8. Glagolev V.M. Description and software correction of lens distortion. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings Tula State University. Technical Sciences*. 2017; (9–4):188–194. (In Russ.)
9. Kholopov I.S. Simplified distortion compensation algorithm for projecting video on priori unknown form aspherical reflective surfaces. *Cifrovaya Obrabotka Signalov = Digital Signal Processing*. 2014;(3): 57–61. (In Russ.)
10. Rong J., Huang S., Shang Z., Ying X. Radial Lens Distortion Correction Using Convolutional Neural Networks Trained with Synthesized Images. In: *Computer Vision. ACCV*:

13th Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, 20–24 November 2016. Springer; 2016. P. 35–49.

11. Kholopov I.S. Algorithm for correcting projective distortions during low-altitude photography. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2017;41(2):284–290. (In Russ.)

12. Zolotukhin Yu.N., Nesterov A.A. Control of the angular position of an aircraft. *Avtometriya = Autometry*. 2015;51(5):35–41. (In Russ.)

13. Alpatov B.A., Ershov M.D., Feldman A.B. Image processing algorithm for combined vision system of aircraft. *Cifrovaya Obrabotka Signalov = Digital Signal Processing*. 2015;(3):8–14. (In Russ.)

14. Belov Yu.S., Rybkin S.V. Mathematical models of geometrical transformations of images in a problem of the analysis of video frames. *Elektronnyy zhurnal: nauka, tekhnika i obrazovanie = Electron Journal: Science, Technology and Education*. 2015;(3):15–24. (In Russ.)

15. Zahlebin A.S. The technique of constructing orthophotoplanes of the terrain using an unmanned quadcopter equipped with a navigation geodetic receiver. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*. 2021;24(3):44–49. (In Russ.)

16. Kern A., Fanta-Jende P., Glira P., Bruckmüller F., Sulzbachner C. An accurate real-time uav mapping solution for the generation of orthomosaics and surface models. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLIII-B1. Strasburg, France; 2021. P. 165–171.

17. Tanathong S., Smith A.P., Remde S. SurfaceView: Seamless and Tile-Based Orthomosaics Using Millions of Street-Level Images From Vehicle-Mounted Cameras. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022;23(4):3482–3497.

18. Gómez-Candón D., De Castro A. I., Lopez-Granados F. The accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*. 2014;(15):44–56.

19. Pagliari D., Pinto L., Sona G. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth. Sci. Inform.* 2014;(7):97–107.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мирошниченко Алексей Павлович,
аспирант, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-5513-837X

Aleksey P. Miroshnichenko, Post-Graduate
Student, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-5513-837X

Мухин Иван Ефимович, доктор технических
наук, Юго-Западный государственный
университет г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences
(Engineering), Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: alexnofoget@gmail.com,
ORCID: 0009-0005-1583-6550