

# Метод итерационной нормализации изображения для задач визуальной навигации БПЛА

М.О. Еланцев<sup>1</sup>, И.О. Архипов<sup>1</sup>, Р.М. Гафаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный университет им. М.Т. Калашникова, Студенческая 7, Ижевск, Россия, 426069

**Аннотация.** В работе представлен метод устранения перспективных искажений изображения, полученного с камеры беспилотного летательного аппарата (БПЛА), для приведения его к параметрам съемки спутникового снимка, который рассчитан на работу на маломощных процессорах. Входной информацией являются: текущее изображение с информацией о положении камеры во время съемки, параметры камеры и предыдущий уже нормализованный кадр. Нормализация осуществляется одним из двух способов. Первый способ применяется в случае, если обрабатывается первый кадр или произошла ошибка обработки предыдущего кадра, и заключается в расчете матрицы трансформации изображения основываясь на параметрах положения камеры в пространстве. Второй способ заключается в сопоставлении текущего кадра с уже нормализованным предыдущим. Сопоставление осуществляется методом статистической дифференциации, во время которого на обоих изображениях выделяются ключевые точки. Результатом сопоставления являются параметры сдвига, поворота и масштаба, которые используются для определения первоначального множества пар соответствующих друг другу ключевых точек. Среди множества пар выбираются четыре пары точек, по которым строится матрица перспективного преобразования, используемая для определения нового множества пар соответственных точек. Процесс повторяется, пока число пар в новом множестве больше, чем в текущем. Накопленная матрица трансформации умножается на матрицу трансформации полученную при нормализации предыдущего кадра. В заключительной части представлены результаты работы метода, показывающие, что предложенный метод позволяет повысить точность работы системы визуальной навигации при малых вычислительных затратах.

## 1. Введение

Данная работа посвящена разработке метода нормализации перспективных преобразований, применяемого на одном из этапов работы системы визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Принцип работы разрабатываемой системы навигации [1] заключается в сопоставлении изображений, получаемых с камеры на борту БПЛА и спутникового снимка области полета. Результатом сопоставления являются параметры смещения, поворота и масштаба такие, что, применив их к изображению с камеры БПЛА, оно будет наложено на соответствующий участок спутникового снимка. Зная координаты спутникового снимка и найденные параметры смещения, поворота и масштаба, можно определить координаты БПЛА.

Во время полета наклон БПЛА не стабилен, он меняется из-за воздействия погодных условий или при выполнении поворотов, что приводит к тому, что изображения с бортовой камеры, даже при использовании стабилизированной платформы, получаются искаженными. По характеру эти искажения являются перспективными. Они мешают корректному сопоставлению изображений с камеры со спутниковым снимком, который, как правило, представлен в ортогональной проекции. Для увеличения вероятности корректного сопоставления необходим метод нормализации перспективных искажений, который приведет изображение с камеры БПЛА к проекции спутникового снимка. Метод должен быть вычислительно простым, так как предполагается его работа на маломощных процессорах БПЛА.

Для решения данной задачи можно использовать несколько подходов. Первый подход заключается в расчете матрицы перспективного искажения на основе внешних параметров камеры, полученных с датчиков БПЛА, определяющих параметры тангажа, рысканья, вращения и высоты полета. В работе [2] компенсация искажений осуществляется путем расчета на основе положения реальной камеры ориентации виртуальной камеры, оптическая ось которой коллинеарна нормали плоскости съемки, т.е. применительно в текущей задаче вид строго сверху. Расчет позволяет оценить матрицу гомографии, связывающую координаты соответствующих пикселей реальной и виртуальной камер. Применения данного подхода осложняется требованием к точной синхронизации моментов фотографирования и фиксации параметров положения БПЛА, а также необходимостью учета наклона подстилающей поверхности.

Второй подход заключается в поиске и анализе расположения известных структурных элементов в кадре при этом каждое изображение обрабатывается независимо. Работа [3] посвящена устранению искажений при съемке штрих-кодов. В статье производится поиск прямых линий, ограничивающих четырехугольную область штрих-кода и дающих четыре угловых точки, которые используются для расчета матрицы преобразования. Данный подход трудно применим в задаче нормализации кадров БПЛА, т.к. в общем случае форма объектов, находящихся на сцене неизвестна.

Третий подход заключается в поиске пар соответствующих элементов на двух изображениях, по которым определяется матрица трансформации одного изображения в другое. Наиболее часто в качестве элементов используются ключевые точки – точки изображения с характерными локальными особенностями. В зависимости от задач и требуемых характеристик могут использоваться разные методы выбора и сопоставления точек [4,5].

В идеальных условиях для определения матрицы трансформации достаточно четырех пар точек, однако на практике из-за шума даже позиция правильно сопоставленных точек может колебаться. Для получения более точного решения составляется система уравнений по всем сопоставленным парам, которая далее обычно решается методом наименьших квадратов с тем, чтобы минимизировать заданную функцию ошибки (метод DLT[6]). В работе [7] предлагается выполнять метод итерационно, отбраковывая ложные сопоставления и получая все более точный результат.

Кроме наличия шума, в множество пар соответственных точек могут попасть и неверно сопоставленные. В этом случае решение методом DLT может дать неверный результат и необходимо применить один из робастных методов. Один из наиболее простых в реализации – метод RANSAC[8,9]: среди множества пар случайным образом выбираются 4, строится матрица гомографии и проверяется, сколько пар точек соответствует этому преобразованию, а сколько нет. Процесс повторяется для других 4 пар из перечня, соответствующему предыдущему преобразованию, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее заданному числу пар или пока не будет превышен порог числа итераций. Похожий по принципу работы метод LMS оценивает текущие 4 пары не по количеству удовлетворяющих преобразованию пар, а по медиане расстояний среди всех пар точек [6].

Описанные робастные методы требуют выполнения большого числа итераций, поэтому не эффективны на маломощных процессорах. Метод RHO [10] нацелен на решение этой проблемы. Вместо случайного выбора 4 пар точек на каждой итерации метод предварительно оценивает каждый из вариантов, выбирает наиболее перспективный и затем проверяет,

насколько правильным был выбор. Это позволяет методу получать решение выполнив существенно меньше итераций.

Четвертый подход заключается в анализе входного изображения с помощью нейросети, что продемонстрировано в работе [11]. Отмечается, что преимуществами данного подхода являются возможность работы в условиях малого количества ключевых точек на входных кадрах, а также устойчивость к размытию изображений. Однако для обработки изображений в режиме реального времени требуется специальное аппаратное обеспечение, что затрудняет применение данного метода в условиях БПЛА.

В предложенном итерационном методе нормализации изображения для задач визуальной навигации БПЛА используется в зависимости от условий первый и третий подходы: нормализация по внешним параметрам камеры (крен, тангаж, рысканье и высота полета) и нормализация с помощью итерационного поиска матрицы гомографии по соответственным ключевым точкам текущего и предыдущего кадров. Первый способ применяется в случае, если обрабатывается первый кадр, либо, если предыдущий кадр не был успешно привязан к спутниковому снимку или не может быть сопоставлен с текущим кадром. Упрощенная схема метода представлена на рисунке 1.

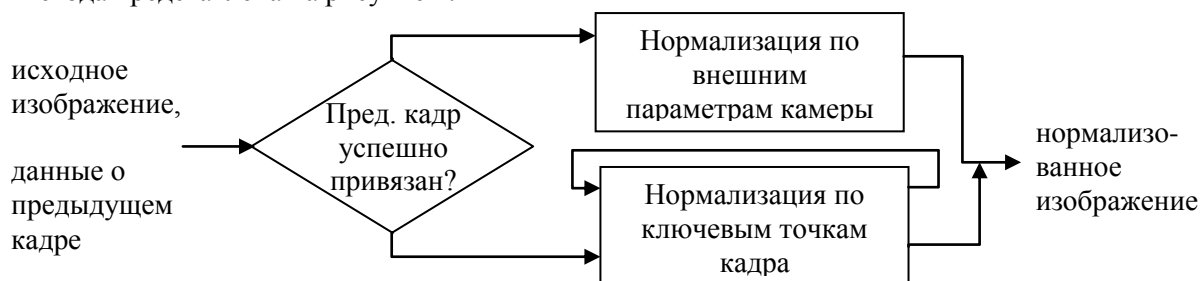


Рисунок 1. Схема работы метода.

## 2. Описание особенностей рассматриваемой задачи

БПЛА осуществляет полет по определенной траектории, которая содержит как прямые участки, так и повороты. Рассматриваемая высота полета составляет 250-500 м. На борту БПЛА находится камера, направленная строго вниз, стабилизационной платформы нет. Камера снимает с такой частотой, что есть, как минимум, 80% перекрытие между текущим и предыдущим кадрами. Параметры фокусного расстояния и размеры фотодатчика камеры известны.

БПЛА оснащен акселерометром и датчиком давления, которые позволяют оценить параметры наклона камеры (крен, тангаж и рысканье), а также ее высоту. Однако, как показывают эксперименты на реальных снимках, моменты съемки и записи параметров в точности не совпадают, поэтому при сильных порывах ветра параметры наклона камеры получаются неточными. Кроме того, датчик давления позволяет оценить высоту полета над уровнем моря, а не высоту над поверхностью, поэтому в расчетах необходимо учитывать карту высот местности.

Результатом нормализации является снимок, приближенный к ортогональной проекции, такой, чтобы его можно было в дальнейшем использовать для сопоставления со спутниковым снимком.

## 3. Нормализация по внешним параметрам камеры

Первый способ нормализации в рамках предложенного метода основывается на информации о положении камеры в пространстве, а именно параметры крена  $\rho$ , тангажа  $\tau$ , рысканья  $\gamma$  и высоты полета  $h_f$ . Кроме этого, к входной информации относится высота местности  $h_a$  в точке съемки и эталонная высота полета  $h_r$ , которая соответствует высоте съемке, при которой масштаб спутникового снимка совпадет с масштабом кадра с камеры БПЛА. Выходной информацией являются коэффициенты матрицы преобразования, устраняющего искажения.

Расчет производится в два этапа: вычисление коэффициентов преобразования без учета масштаба и вычисление коэффициента масштабирования.

3.1. Вычисление коэффициентов преобразования без учета масштаба

Область видимости камеры можно представить в виде пирамиды, которая пересекается с плоскостью земной поверхности. Для упрощения расчета, вместо наклона пирамиды, согласно повороту камеры, наклоняется плоскость земной поверхности и помещается в один из углов пирамиды, как показано на рисунке 2а.

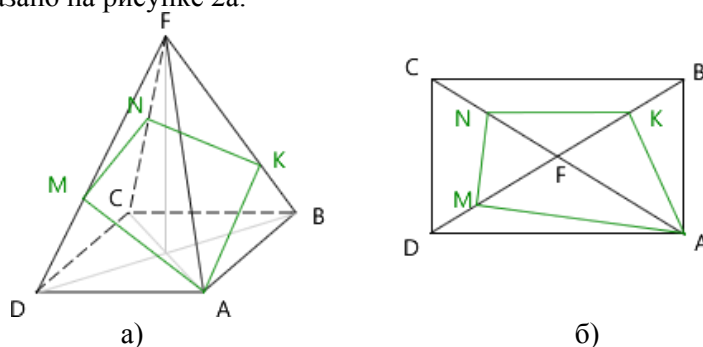


Рисунок 2. Пирамида области видимости: (а) вид сбоку под углом, MNK – сечение с плоскостью земной поверхности, (б) вид сверху.

Задача первого этапа сводится к расчету координат точек М, N, К на проекции вида сверху (рисунок 2б). Используя координаты этих точек можно определить результирующее преобразование, рассчитав матрицу гомографии  $T_a$  по четырем парам точек: А-А', В-В', С-С', D-D'. Преобразование каждой пары точек можно описать в виде двух уравнений [12]:

$$x' = \frac{t_{11}x + t_{12}y + t_{13}}{t_{31}x + t_{32}y + 1} \quad y' = \frac{t_{21}x + t_{22}y + t_{23}}{t_{31}x + t_{32}y + 1} \tag{1}$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точки до преобразования,  $x'$  и  $y'$  – координаты точки после преобразования,  $t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{31}$  и  $t_{32}$  – коэффициенты матрицы преобразования  $T_a$ , для расчета которых необходимо решить систему из 8-ми линейных уравнений.

Форма пирамиды зависит от размера фотодатчика и фокусного расстояния. Углы обзора рассчитываются следующим образом:

$$\alpha_x = 2 \operatorname{arctg} \frac{m_w}{2f_L} \quad \alpha_y = 2 \operatorname{arctg} \frac{m_h}{2f_L} \tag{2}$$

где  $m_w$  и  $m_h$  – размеры фотодатчика,  $f_L$  – фокусное расстояние. Плоские углы при вершине пирамиды вычисляются следующим образом:

$$\beta_x = \frac{m_w}{m_h} \sin \frac{\alpha_y}{2} \quad \beta_y = \frac{m_h}{m_w} \sin \frac{\alpha_x}{2} \tag{3}$$

Длина ребра пирамиды  $l_e$  и диагональ основания пирамиды  $l_d$ :

$$l_e = \frac{m_h}{2 \sin(\beta_y/2)} \quad l_d = \sqrt{m_w^2 + m_h^2} \tag{4}$$

В зависимости от наклона камеры плоскость земной поверхности помещается в один из четырех углов, как показано на рисунке 3.

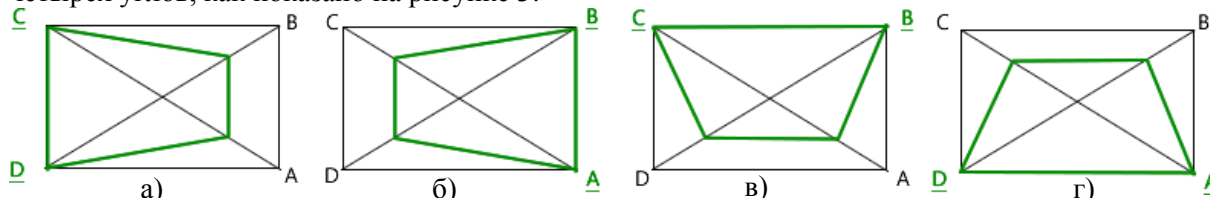


Рисунок 3. Расположение сечения плоскости земной поверхности в зависимости от значения наклона камеры: (а)  $\tau = 0, \rho < 0$ , (б)  $\tau = 0, \rho > 0$ , (в)  $\tau > 0, \rho = 0$ , (г)  $\tau < 0, \rho = 0$ .

Вершины переименовываются согласно следующему правилу: вершина, совпадающая с углом сечения именуется А', далее против часовой стрелке: В', С', D'.

Координаты вершины К:

$$d_k = m_w \frac{\sin \rho}{\cos(\beta_x/2 - \rho)}$$

$$K_x = \left| D'_x - d_k \frac{m_w}{2l_e} \right| \quad K_y = \left| D'_y - d_k \frac{m_h}{2l_e} \right| \quad (5)$$

Координаты вершины М:

$$d_m = m_h \frac{\sin \tau}{\cos(\beta_y/2 - \tau)}$$

$$M_x = \left| B'_x - d_m \frac{m_w}{2l_e} \right| \quad M_y = \left| B'_y - d_m \frac{m_h}{2l_e} \right| \quad (6)$$

Координаты вершины N:

$$d_{nk} = m_h - 2d_k \cos \frac{\pi - \beta_y}{2} - \sin \frac{\pi - \beta_y}{2} / \sin(\pi - \tau - \frac{\pi - \beta_y}{2})$$

$$d_{fk} = d_e - d_k \quad d_{nfb} = -2d_{fk} \cos \beta_y \quad (7)$$

$$d_{nf} = (\sqrt{d_{nfb}^2 - 4(d_{fk}^2 - d_{nk}^2)} - d_{nfb})/2$$

$$N_x = \left| \frac{C'_x - A'_x}{2} + d_{nf} \frac{m_w}{2l_e} \right| \quad N_y = \left| \frac{C'_y - A'_y}{2} + d_{nf} \frac{m_h}{2l_e} \right|$$

Для учета направления на Север, необходимо вычислить:

$$T_n = T_a \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 3.2. Вычисление коэффициента масштаба

Так как для определения коэффициентов преобразования плоскость земной поверхности была помещена в один из углов пирамиды, то это преобразование не сохранило масштаб. Масштаб рассчитывается следующим образом:

$$d_{nd} = \sqrt{(N_x - A'_x)^2 + (N_y - A'_y)^2}$$

$$S_n = \frac{l_e d_{nd}}{d_{nf} l_d} \quad (9)$$

Для приведения масштаба изображения с камеры БПЛА к масштабу спутникового снимка, необходимо скорректировать коэффициент согласно формуле:

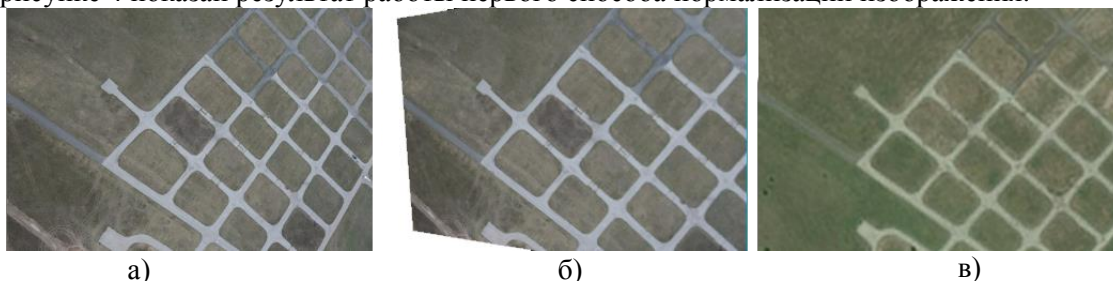
$$S_r = S_n \frac{h_r - h_a}{h_f - h_a} \quad (10)$$

### 3.3. Результат нормализации

Для получения финальной матрицы преобразования необходимо выполнить:

$$T_r = T_n \begin{pmatrix} S_r & 0 & 0 \\ 0 & S_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

На рисунке 4 показан результат работы первого способа нормализации изображения.



**Рисунок 4.** Нормализация изображения по внешним параметрам камеры: (а) исходное изображение, (б) нормализованное, (в) участок той же местности на спутниковом снимке.

## 4. Нормализация по ключевым точкам кадра

Первый способ предложенного метода нормализации служит лишь для грубой компенсации искажений, так как, как было сказано выше, момент фиксации параметров положения камеры

может не совпадать с моментом съемки, кроме того, довольно сложно точно учесть высоту наклона и перепада подстилающей поверхности. Поэтому он применяется только, если данных о привязке предыдущего кадра к спутниковому снимку нет. В остальных случаях для получения более точных результатов служит второй способ, который использует сопоставление текущего кадра с предыдущим уже нормализованным кадром.

#### 4.1. Сопоставление изображения текущего кадра с предыдущим

Для уменьшения сложности алгоритма сопоставления изображений, сопоставляются не все пиксели изображений, а только ключевые точки, выделенные методом, описанным в статье [13]. После нахождения ключевых точек на обоих изображениях выполняется процедура определения параметров сдвига, поворота и масштаба методом статистической дифференциации [14] таких, что при их использовании положения соответствующих друг другу ключевых точек совпадут. Параметры сдвига, поворота и масштаба образуют следующую матрицу трансформации [15]:

$$H_m = \begin{pmatrix} s \cos \phi & -s \sin \phi & t_x \\ s \sin \phi & s \cos \phi & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где  $t_x$  и  $t_y$  – сдвиг по оси X и оси Y, соответственно,  $\phi$  – поворот,  $s$  – масштаб.

#### 4.2. Выбор пар соответственных точек

Найдя матрицу трансформации необходимо сформировать множество пар соответственных точек. Точка A текущего кадра является парой точке B предыдущего кадра, если после применения матрицы трансформации к текущему кадру, расстояния между точками A и B не превышает заданного порога (1-2 пикселя).

Среди множества пар соответственных точек необходимо выбрать четыре пары точек, по которым будет вычислена матрица трансформации путем решения системы из четырех пар линейных уравнений (1). Выбор ограничен условием, что никакие три точки не должны быть коллинеарными. Наилучшим случаем является, нахождение четырёхугольника максимальной площади с как можно большими углами, однако поиск такого набора точек является вычислительно сложной операцией. В работе были испробованы следующие подходы к выбору точек:

- 1) выбор четырех ближайших к углам изображения точек;
- 2) выбор четырех самых отдаленных от центра масс точек, расположенных в разных квадрантах относительно центра масс;
- 3) первая точка – самая удаленная от центра масс, вторая точка – самая отдаленная от точки 1, третья – точка с наибольшей суммой расстояний от точек 1 и 2, четвертая – точка с наибольшей суммой расстояний от точек 1, 2 и 3;
- 4) случайный выбор точек.

Если при сопоставлении текущего и предыдущего кадров оказалось меньше четырех пар соответственных точек, то вместо второго выполняется первый способ нормализации.

#### 4.3. Расчет преобразования

Выбрав четыре пары соответственных точек, рассчитывается матрица уточненной трансформации, которая приводит проекцию текущего кадра к проекции предыдущего уже нормализованного кадра.

После этого процедура поиска пар соответственных точек между текущим кадром и предыдущим повторяется, используя уже уточненную матрицу трансформации. Далее среди пар снова выбираются четыре пары и рассчитывается новая уточненная матрица. Процесс повторяется до тех пор, пока количество пар соответственных точек продолжает расти. Как показали эксперименты, в большинстве случаев достаточно 2 итераций.

Итоговая матрица преобразования исходного изображения в нормализованное определяется по формуле:

$$T_r = T_p \prod_{i=1}^n H_i \quad (13)$$

где  $T_p$  – матрица перспективной трансформации для нормализации предыдущего кадра,  $H_i$  – матрицы трансформаций, полученных на каждой из итерации,  $n$  – число итераций.

В виду того, что для нормализации текущего кадра используется предыдущий кадр, то ошибка нормализации может накапливаться. Однако данный метод используется в составе системы навигации, которая предполагает следующим шагом привязку к спутниковому снимку, что позволяет сбрасывать накапливаемую ошибку.

### 5. Исследование разработанного метода

Для тестирования работы предложенного метода он был встроен в разрабатываемую систему визуальной навигации БПЛА в качестве предварительной обработки кадра. Далее была проведена серия экспериментов на реальных снимках полета БПЛА по траектории, представленной на рисунке 5. Траектория состоит из участков двух типов: движение по прямой (270 кадров) и повороты (70 кадров).



**Рисунок 5.** Траектория, участвующая в экспериментах. Положения БПЛА на кадрах с движением по прямой отмечены зелеными точками, с поворотом – желтыми. Черными отрезками отмечены границы между участками. Белыми отрезками соединены координаты БПЛА и соответствующие им центры фотографирования.

Первый эксперимент направлен на выбор лучшего алгоритма определения матрицы гомографии во втором способе предложенного метода. Были протестированы предложенный итерационный метод (с четырьмя описанными выше вариантам выбора 4-х точек), а также методы, реализованные в библиотеке OpenCV версии 3.4.5: DLT, RANSAC, LMS и RHO. Для определения скорости работы методов каждый входной кадр был обработан 100 раз и вычислено среднее время выполнения. Обработка происходила на процессоре AMD FX-8320E 3.2 GHz без использования вычислительных средств графического ускорителя.

В таблице 1 представлены результаты обработки. Методы оценивались по показателю увеличения числа пар соответственных точек и скорости работы. По первому критерию лучшими оказались методы, реализованные в библиотеке OpenCV: RANSAC, LMS, RHO. Они позволяют на данной траектории увеличить число пар соответственных точек на ~20 штук (~13% от изначального количества). Однако для реализации системы навигации БПЛА критичным является скорость работы. По этому показателю лучшим оказался предложенный итерационный метод с вариантами выбора пар 1-3. Он позволяет выполнять обработку за ~0.03-0.06мс, что примерно в ~5-10 раз быстрее, чем наилучший из методов OpenCV, при этом увеличивает число пар соответственных точек на ~15 штук (~10%). Высокая скорость работы метода обуславливается тем, что для поиска результирующей матрицы в большинстве случаев достаточно двух итераций. Таким образом, принимая во внимания оба фактора для второго эксперимента были выбраны методы: предложенный итерационный с первым вариантом выбора точек и метод RHO.

Второй эксперимент нацелен на определение, какой эффект дает интеграция метода нормализации в систему визуальной навигации БПЛА. Для этого была осуществлена привязка к спутниковому снимку как изображений с нормализацией, так и без и оценено, как при этом меняется количество успешно привязанных изображений, а также расстояние между

автоматически определенным центром привязки и вручную размеченным. Результаты эксперимента показаны в таблице 2.

**Таблица 1.** Сравнение результатов работы различных вариантов определения матрицы гомографии.

Показатель	Участок	Предложенный метод				DLT	RAN SAC	LMS	RHO
		1 вариант выбора пар	2 вариант выбора пар	3 вариант выбора пар	4 вариант выбора пар				
Среднее число пар соответственных точек до обработки	движение по прямой	156.8							
	повороты	123.2							
	вся траектория	150.0							
Среднее число пар соответственных точек после обработки	движение по прямой	173.5	171.5	172.1	158.9	175.0	177.5	<b>178.3</b>	178.2
	повороты	136.7	133.6	135.0	125.6	138.7	141.3	<b>142.6</b>	142.0
	вся траектория	165.8	163.7	164.5	152	167.5	170	<b>170.9</b>	170.7
Среднее число итераций разработанного метода	движение по прямой	1.9	1.8	1.8	1.2	-			
	повороты	1.8	1.7	1.7	1.2	-			
	вся траектория	1.9	1.8	1.8	1.2	-			
Среднее время обработки одного кадра (мс)	движение по прямой	0.06	0.05	0.07	<b>0.03</b>	0.33	0.52	2.72	0.313
	повороты	0.05	0.04	0.06	<b>0.03</b>	0.31	0.57	2.70	0.24
	вся траектория	0.06	<b>0.03</b>	0.06	<b>0.03</b>	0.33	0.53	2.72	0.30

**Таблица 2.** Влияние методов нормализации на результат системы визуальной навигации.

Показатель	Участок	Без нормализации	Предложенный метод с 1 вариантом выбора пар	RHO
Число кадров	движение по прямой	270		
	повороты	70		
	вся траектория	340		
Число успешно привязанных кадров	движение по прямой	226 (83.7%)	<b>246 (91.1%)</b>	<b>246 (91.1%)</b>
	повороты	59 (84.3%)	<b>64 (91.4%)</b>	62 (88%)
	вся траектория	285 (83.8%)	<b>310 (91.1%)</b>	308 (90.6%)
Среднее расстояние между вычисленным центром фотографирования и размеченным (пиксели)	движение по прямой	16.0	<b>6.6</b>	6.8
	повороты	7.5	<b>6.4</b>	6.7
	вся траектория	16.0	<b>6.6</b>	6.7

Проанализировав результаты эксперимента, можно сделать вывод, что предварительная нормализация изображения существенно улучшает работу разрабатываемой системы визуальной навигации БПЛА как с точки зрения числа привязанных кадров, так и с точки зрения точности вычисленных координат БПЛА. Методы хорошо работают как на участках с прямым движением, так и на участках с поворотами. Разработанный метод показал результат не хуже, чем метод RHO из библиотеки OpenCV, но при этом он работает значительно быстрее.

## 6. Заключение

Разработанный метод итерационной нормализации изображения успешно решает задачи, стоящие при реализации системы визуальной навигации БПЛА. Применение предложенного метода в составе системы навигации улучшает точность привязки к спутниковому снимку и уменьшает вероятность ее потери.



Метод позволяет устранить искажения не только связанные с наклоном камеры, но и с наклоном подстилающей поверхности, благодаря второму этапу. При этом разработанный метод не является вычислительно сложным и может быть встроен в систему навигации БПЛА, которая должна работать на маломощных процессорах.

## 7. Литература

- [1] Гафаров, Р.М. Применение метода статистической дифференциации для координатной привязки аэрофотоизображения к космическому снимку / Р.М. Гафаров, И.О. Архипов, А.В. Коробейников, М.О. Еланцев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Т. 15, № 2. – С. 109-112. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-2-109-112.
- [2] Холопов, И.С. Алгоритм коррекции проективных искажений при маловысотной съёмке / И.С. Холопов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 284-290. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-284-290.
- [3] Борискевич, А.А. Устойчивый метод нормализации отсканированного мобильным устройством изображения штрихкода / А.А. Борискевич // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2016. – № 4. – С. 106-112.
- [4] Корнеев, М.А. Методы выделения точек привязки для визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов / М.А. Корнеев, А.Н. Максимов, Н.А. Максимов // Труды МАИ. – 2012. – № 58.
- [5] Гончаренко, М.О. Сравнительный анализ методов формирования дескрипторов изображений в контексте задачи сегментации видеопотока / М.О. Гончаренко // Бионика интеллекта. – 2015. – № 2. – С. 90-94.
- [6] Hartley, R. Multiple view geometry in computer vision / R. Hartley, A. Zisserman. – Cambridge University Press, 2003. – 655 p.
- [7] Ефимов, А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений / А.И. Ефимов, А.И. Новиков // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 258-265. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265.
- [8] Agarwal, A. A survey of planar homography estimation techniques / A. Agarwal, C.V. Jawahar, P.J. Narayanan // Centre for Visual Information Technology International Institute of Information Technology, 2005.
- [9] Гошин, Е.В. Двухэтапное формирование пространственного преобразования для совмещения изображений / Е.В. Гошин, А.П. Котов, В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 886-891. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-4-886-891.
- [10] Bazargani, H. A fast and robust homography scheme for real-time planar target detection / H. Bazargani, O. Bilaniuk, R. Laganier // Journal of Real-Time Image Processing. – 2015. – Vol. 15(4). – P. 739-758. DOI: 10.1007/s11554-015-0508-4.
- [11] DeTone, D. Deep image homography estimation / D. DeTone, T. Malisiewicz, A. Rabinovich // arXiv preprint, 2016. – ArXiv: 1606.03798.
- [12] Glasbey, C.A. A review of image-warping methods / C.A. Glasbey, K.V. Mardia // Journal of Applied Statistics. – 1998. – Vol. 25(2). – P. 155-171.
- [13] Архипов, И.О. Алгоритм позиционирования БПЛА по последовательности кадров видеопотока / И.О. Архипов, М.А. Мишенков, А.А. Шутов, М.О. Еланцев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 66-69. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-66-69
- [14] Гафаров, М.Р. Определение параметров геометрических трансформаций изображений методом статистической дифференциации / М.Р. Гафаров, Р.М. Гафаров, Е.С. Полтанова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – Т. 1, № 25. – С. 41-44.
- [15] Чехлов, Д. О. Нормализация изображений относительно перспективного преобразования на основе геометрических параметров / Д.О. Чехлов, С.В. Абламейко // Информатика. – 2004. – Т. 3. – С. 67-76.

## The method of iterative image normalization for tasks of visual navigation of UAVs

M.O. Elantcev<sup>1</sup>, I.O. Arkhipov<sup>1</sup>, R.M. Gafarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Studencheskaya 7, Izevsk, Russia, 426069

**Abstract.** The work deals with the method for perspective distortion elimination of an image obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV) camera, in order to transform it according to satellite imagery. Normalization is done in one of two ways. The first variant is used when information about previous frame cannot be used. This variant consists in calculation of image transformation matrix based on camera position and orientation. The second variant is based on matching of current image with previous one. The result of matching are parameters of shift, rotation and scale, which are used to obtain the initial set of pairs of corresponding keypoints. Among the set of pairs, four pairs are selected, which are used to calculate perspective transformation matrix. This matrix is used to obtain a new set of pairs of corresponding keypoints. The process repeats, while the number of pairs in the new set is greater than in the current one. The accumulated transformation matrix is multiplied by the transformation matrix obtained by normalizing the previous frame. In the final part presents the results of the method, showing that the proposed method can improve the accuracy of the visual navigation system at low computational costs.