

## МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 004.932.2

И. О. Архипов, кандидат технических наук, доцент

М. О. Еланцев, аспирант

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ЗРИТЕЛЬНЫМ ОБРАЗАМ

В статье предложена методика определения координат летательного аппарата, основанная на сопоставлении последовательных кадров, полученных с камеры на борту летательного средства, если известна начальная координата и съемка ведется со скоростью не менее 25 кадров в секунду. Данная методика является резервным средством навигации при потере сигнала GPS или ГЛОНАСС. В статье рассмотрен вопрос определения параметров аффинного преобразования кадров, основанный на отслеживании ключевых объектов на серии снимков. В качестве результата демонстрируется решение задачи склейки кадров камеры вдоль траектории полета летательного средства.

**Ключевые слова:** навигация, летательный аппарат, БПЛА, машинное зрение.

#### Введение

Навигация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) обычно осуществляется по сигналам глобальных навигационных систем GPS или ГЛОНАСС. Если сигнал будет недоступен или намеренно искажен, летательный аппарат потеряет ориентацию, что может привести к поломке оборудования. Это обуславливает актуальность разработки резервного метода навигации. Представленная в статье методика позволяет определять координаты летательного аппарата путем сопоставления изображений, полученных с камеры на борту БПЛА, если известна координата начала пути движения.

В работе [1] данная задача решалась сопоставлением ключевых точек двух последовательных изображений бортовой камеры с помощью инвариантных моментов [2], вычисленных по окрестности ключевых точек. Недостатком такого решения является сложность вычисления моментов и большой диапазон значений моментов разного порядка. В данной работе предполагается, что при скорости съемки 25–30 кадров в секунду ключевые объекты на соседних кадрах будут перемещаться на расстояние не более чем два пикселя. Это существенно упрощает сопоставление изображений, т. к. поиск объекта на текущем кадре ведется лишь в ближайшей окрестности относительно этого объекта на предыдущем кадре.

#### Математическая модель кадра

Выделение ключевых объектов осуществляется тем же методом, что и в работе [3]. Входное изображение подвергается предварительной обработке (перевод в градации серого, повышение контраста), затем к нему применяется медианная фильтрация с двумя разными размерами окон. Из результата фильтра с меньшим окном поэлементно вычитается результат фильтра. По полученному разностному изображению строится гистограмма. Два порога  $T_{m1}$  и  $T_{m2}$  разделяют все значения на два класса:

- $V^-$  – точки со значением меньше  $T_{m1}$ ;
- $V^+$  – точки со значением больше  $T_{m2}$ .

Пороги  $T_{m1}$  и  $T_{m2}$  выбираются автоматически, отсекая 10 % площади гистограммы слева и 10 % справа соответственно (рис. 1).

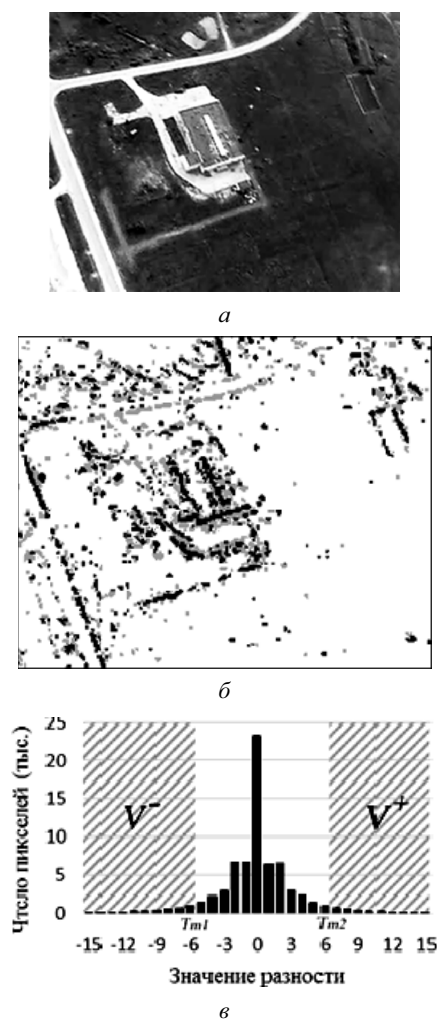


Рис. 1. Выделение ключевых объектов:  $a$  – оригинальное изображение;  $b$  – выделенные ключевые объекты (серые – класса  $V^-$ , черные – класса  $V^+$ );  $c$  – гистограмма значений разностного изображения

Связные области точек одного класса являются ключевыми объектами, координаты которых определяются центром массы областей. Разность медианных фильтров позволяет выделить либо компактные объекты малой площади, либо протяженные объекты (рис. 1, б). Центр масс протяженных объектов не стабилен во времени, поэтому необходимо выполнить селекцию ключевых объектов по их площади. В кадре остаются только объекты площади  $S_{\min} \leq S_j \leq S_{\max}$ , где  $S_{\min}$  – порог отсеечения шума;  $S_{\max}$  – порог отсеечения протяженных объектов. Результат селекции ключевых объектов показан на рис. 2.

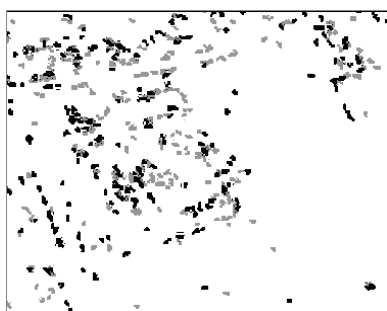


Рис. 2. Ключевые объекты кадра после селекции по площади

Для определения траектории движения ключевых объектов необходимо сопоставить их с объектами предыдущего кадра. Объекты сопоставляются при условии:

- классы объектов совпадают;
- расстояние между объектами не превышает порог  $D$  и оно минимальное среди всех кандидатов в ближайшей окрестности;
- объект еще не сопоставлен с другим.

Несопоставленные объекты предыдущего кадра отбрасываются.

Таким образом, каждый кадр описывается с помощью кортежа:

$$F = \langle t, P \rangle, \quad (1)$$

где  $t$  – порядковый номер кадра;  $P = \{p_1, p_2, \dots\}$  – множество ключевых объектов кадра:

$$p_i = \langle C, V \rangle, \quad (2)$$

где  $i$  – номер объекта в кадре;  $C = \langle x_1, y_1 \rangle, \langle x_2, y_2 \rangle, \dots \rangle$  – множество координат предыстории объекта;  $|C|$  – время жизни объекта (число последовательных кадров, на которых присутствует объект);  $V \in \{V^-, V^+\}$  – класс объекта.

### Построение траектории движения

Для определения траектории движения БПЛА необходимо вычислять параметры трансформации изображения между кадрами. Однако малые различия между последовательными кадрами не позволяют вычислить параметры трансформации с достаточной точностью. Для повышения точности следует срав-

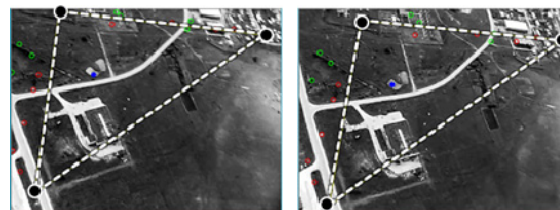
нивать кадры через определенный интервал сопоставления  $I_s$ , который выбирается из диапазона 10–20 кадров.

Кроме того, важно учесть, что при движении БПЛА помимо положения в пространстве меняются его крен, тангаж и рысканье. Такие трансформации с достаточной точностью можно описать с помощью аффинных преобразований [4], работать с которыми удобно в виде матрицы трансформации в однородной системе координат:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

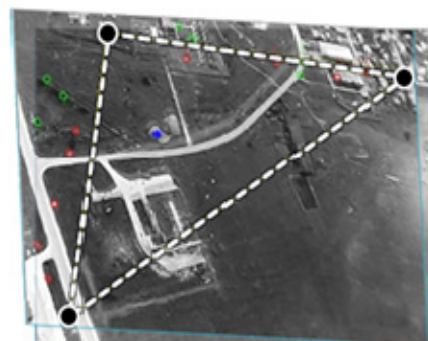
Для вычисления матрицы аффинного преобразования требуется выделить среди всех ключевых объектов текущего кадра три объекта (рис. 3), которые удовлетворяют условиям:

- являются долгоживущими, т. е. время жизни которых превышает порог интервала сопоставления;
- образуют треугольник наибольшей площади, при этом площадь должна быть больше заданного порога  $S_{lm}$ .



а

б



в

Рис. 3. Сопоставление кадров по трем ключевым объектам: а – положение выделенных объектов  $I_s$  кадров назад; б – положение выделенных объектов на текущем кадре; в – совмещение кадров с помощью аффинной трансформации

Если подходящие объекты удалось найти, матрица трансформации текущего кадра может быть определена путем решения системы уравнений

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & 0 \\ t_{31} & t_{32} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $t_{11-23}$  – искомые коэффициенты матрицы;  $x_i$  и  $y_i$  – координаты выбранных объектов  $I_s$  кадров назад,

а  $x'_i$  и  $y'_i$  – координаты выбранных объектов на текущем кадре.

Если трех подходящих объектов не удалось найти, коэффициенты матрицы трансформации учитывают только сдвиг кадров и определяются по разности координат центров масс долгоживущих объектов на сопоставляемых кадрах

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ C_{mx} - C'_{mx} & C_{my} - C'_{my} & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $C_{mx}$  и  $C_{my}$  – координаты центра масс долгоживущих объектов  $I_s$  кадров назад;  $C'_{mx}$  и  $C'_{my}$  – координаты центра масс долгоживущих на текущем кадре.

#### Определение текущей координаты БПЛА

При потере сигнала глобального позиционирования из памяти извлекаются последние достоверные координаты БПЛА  $G_0$ , снимок местности  $F_0$ , соответствующий этим координатам, и значение азимута  $A_0$ . Кадр  $F_0$  располагается в системе координат навигационной системы по зрительным образам так, что нулевые координаты совпадают с центром кадра, а ось ординат направлена на север. Далее по известной высоте полета, азимуту, углу обзора объектива и разрешению снимка вычисляются цены деления  $r_x$  и  $r_y$  координатных осей снимка для последующего определения географических координат.

Во время работы системы навигации матрица трансформации кадра  $F_N$ , соответствующая  $N$ -му интервалу сопоставления, по отношению к кадру  $F_0$  может быть вычислена по формуле [5]:

$$T_N = \prod_{i=1}^N T_i, \quad (6)$$

где  $T_i$  – матрица трансформации кадра  $i$ -го интервала сопоставления.

Координатой БПЛА на кадре  $F_N$  в заданной системе координат будет точка с координатами:

$$\begin{aligned} B_{Nx} &= T_N[3,1]; \\ B_{Ny} &= T_N[3,2]. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда географическая координата БПЛА будет равна:

$$G_N = \langle B_{Nx} r_x ; B_{Ny} r_y \rangle. \quad (8)$$

#### Результаты

Предложенный метод был протестирован на серии из 275 кадров размером 320×240 пикселей, соответствующим 11 секундам полета со стабилизированным видео. Интервал сопоставления был равен 10 кадрам. По результатам работы методики была произведена склейка изображений, получаемых вдоль направления полета с учетом вычисленных трансформаций кадров. Как показано на рис. 4, сопоставление кадров выполнилось с высокой точностью, что доказывает работоспособность предлагаемой методики.

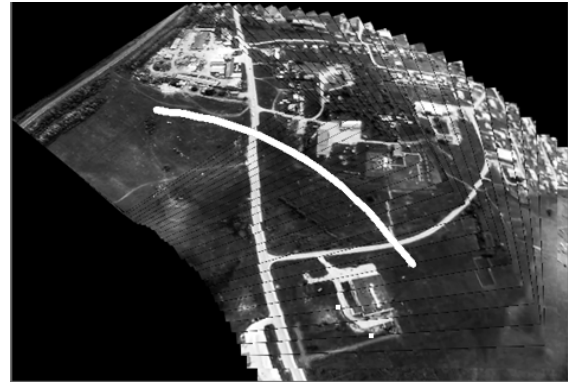


Рис. 4. Склейка кадров полета

#### Заключение

Предложенный вспомогательный метод навигации успешно работает в случаях съемки со стабилизацией видеокamеры. Кроме того, методика может применяться для навигации, в том числе и при полете над территорией, где нет ориентиров, стабильных длительное время, поскольку основана на межкадровом сопоставлении текущих снимков, снятых с высокой скоростью. Требование стабилизации видеокamеры является недостатком предлагаемой методики, т. к. при отсутствии стабилизации возможны потери траектории долгоживущих объектов. Тем не менее указанный недостаток можно минимизировать с использованием адаптивных порогов при поиске ключевых объектов.

#### Библиографические ссылки

1. Максимов А. Н., Еланцев М. О., Архитов И. О., Широков В. А. Сопоставление характерных точек на последовательных кадрах в задачах аэронавигации по зрительным образам // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием / отв. за выпуск: А. П. Тюрин, В. В. Сяктерева. – Ижевск, 2016. – С. 428–432.
2. Ни М. К. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. – IRE Transactions on Information Theory 8, 1962. – Pp. 179–187.
3. Максимов А. Н., Еланцев М. О., Архитов И. О., Широков В. А. Сопоставление характерных точек на последовательных кадрах в задачах аэронавигации по зрительным образам // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием / отв. за выпуск: А. П. Тюрин, В. В. Сяктерева. – Ижевск, 2016. – С. 428–432.
4. Фоли Д., вэн Дэм А. Основы интерактивной машинной графики / пер. с англ. – В 2 т. – М. : Мир, 1985. – 368 с. : ил.
5. Графский О. А. Основы аффинной и проективной геометрии : учеб. пособие. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 135 с.

\* \* \*

*I. O. Arkhipov*, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

*M. O. Elantsev*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

#### **Method for Determining Aerial Vehicle Coordinates by Visual Analysis**

*The article proposes a method for determining aerial vehicle coordinates based on matching of consecutive frames taken from the camera on aerial vehicle when initial coordinates are known and the camera is working with the speed of at least 25 frames per second. This method is a part of a reserve navigation system for the situation when GPS or GLONASS signals are lost. The algorithm for determining the affine transform parameters of frames based on key objects tracking is given in the article. The result demonstrates solution for stitching of frames along the path of the aerial vehicle.*

**Keywords:** navigation, aerial vehicle, UAV, computer vision.

Получено: 02.12.16