
УДК 004.2:004.93: 004.94

Д.В. Волошин

Ин-т программных систем НАН Украины
(Украина, 03187, Киев, пр-т Академика Глушкова, 40 г,
тел: +380954900641, e-mail: wdmytriy@gmail.com)

Моделирование автономной навигации беспилотного летательного аппарата на основе обработки видеоданных

Рассмотрена задача автономной навигации беспилотного летательного аппарата. Описаны основные этапы построения модели автономной навигации и разработан метод определения ее параметров с помощью алгоритма ASIFT на основе обработки данных видеоряда. Приведены результаты экспериментального моделирования навигации без наличия GPS сигнала, которые подтверждают практический потенциал модели.

Розглянуто задачу автономної навігації безпілотного літального апарату. Описано основні етапи побудови моделі автономної навігації та розроблено метод визначення її параметрів з використанням алгоритму ASIFT на основі обробки даних відеоряду. Наведено результати експериментального моделювання навігації без наявності GPS сигналу, які підтверджують практичний потенціал моделі.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автономная навигация, беспилотный летательный аппарат, ASIFT, компьютерное зрение.

В настоящее время актуальной является задача аэроразведки — комплекса мероприятий для обнаружения объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Беспилотный летательный аппарат принадлежит к классу беспилотных воздушных транспортных аппаратов, управляемых дистанционно. В соответствии с классификацией международной организации гражданской авиации это самолет без пилота на борту. В [2] дано определение двух основных типов БПЛА — «крылья» и «коптер», имеющих различные характеристики (механику полета, эффективную высоту полета и др.)

При выполнении задач аэроразведки в реальных условиях часто теряется связь с оператором БПЛА или происходит искажение GPS сигнала. Одним из способов решения данной проблемы является переход БПЛА в автономный режим, когда решения по навигации принимаются исклю-

© Д.В. Волошин, 2016

чительно электронным бортовым компьютером без участия оператора на основе доступных данных полета, например данных видеопотока с камеры БПЛА.

Постановка задачи. Стандартные навигационные системы БПЛА зависят от системы глобального позиционирования (GPS) и блока инерционного измерения (IMU, Inertial Measurement Unit) [3]. В летательных аппаратах сигнал GPS может быть заблокирован либо принят с помехами (особенно на гражданских частотах). Однако IMU аккумулирует ошибку и через несколько секунд (для малогабаритных летательных аппаратов, использующих дешевые IMU) данные измерений становятся ложными. В связи с этим большое число исследований направлено на повышение эффективности и надежности GPS/IMU навигации с использованием видеокамеры БПЛА. Навигация на основе зрения (VBN, Vision-Based Navigation) позволяет определять позиции наблюдения с использованием, например, алгоритма расширенного фильтра Калмана [4] для точного определения параметров позиции летательного аппарата.

Другим современным подходом к решению этой задачи является навигация на основе похожих признаков (FBN, Feature-Based Navigation) [5] или контрольных точек местности [6]. Этот подход основан на сравнении текущих изображений, снятых с бортовой видеокамеры, с предыдущими эталонными изображениями, как правило, полученными, когда GPS сигнал был гарантированно корректным. Система сравнивает место похожих признаков (для которых в бортовой памяти могут быть записаны координаты), полученных изображений, чтобы с их помощью определить местоположение БПЛА.

Оперативная реакция на изменение внешней обстановки и принятие решений в режиме реального времени, обработка видеоданных средствами, доступными БПЛА, навигация на основе динамических данных являются в настоящее время наиболее актуальными задачами.

Рассмотрим задачу автономной навигации БПЛА типа «крылья» в случае утраты связи с оператором. Эта задача особенно актуальна, когда сигнал GPS блокируется или подменяется, что вызывает сбой в управлении аппаратом и ведет к его утрате, либо в случае столкновения с препятствием или разрядки аккумулятора. В таких случаях необходимо, чтобы БПЛА мог самостоятельно определить свое местоположение и спланировать маршрут возвращения на базовую станцию.

Структурная схема модулей управления и навигации БПЛА приведена на рис. 1. Задача автономной навигации возникает при потере связи между первым 5 и вторым 9 приемопередающими модулями и необходимости принятия решения автопилотом 4 на основе данных аппаратуры наблюдения 3.

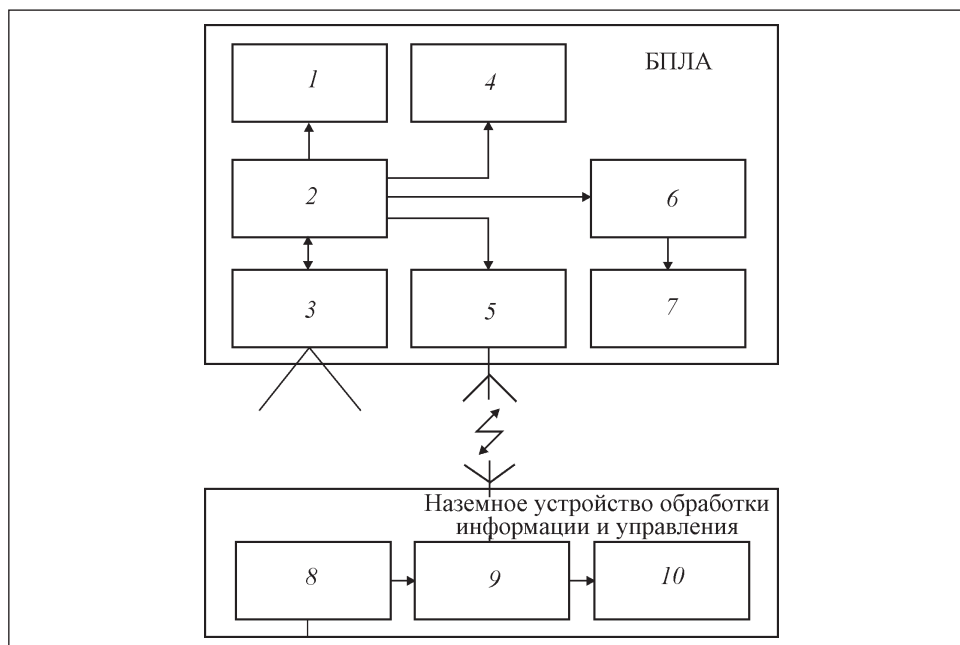


Рис. 1. Структурная схема БПЛА: 1 — двигательная установка; 2 — контроллер; 3 — аппаратура наблюдения; 4 — автопилот; 5 и 9 — первый и второй приемопередающие модули; 6 — рулевой привод; 7 — аэродинамические рули; 8 — блок управления; 10 — блок обработки и отображения информации

В типичной модификации БПЛА в блоке 3 находятся: камера наблюдения, гироскоп, альтиметр, датчики скоростей (включая датчики угловых скоростей) на основе GPS координат и, в редких случаях, телевизор. В такой конфигурации анализ и обработка данных для определения местоположения в аналитическом виде является очень сложной задачей, особенно в случае моделирования реальной ситуации. Такие факторы как порывы ветра, изменение высоты вследствие давления, облачность очень сложно измерить точно и тем более запрограммировать в детерминированную модель управления.

Следовательно, при моделировании необходимо учитывать стохастические возмущения, влияющие на решения автопилота, и постоянно корректировать работу рулевого модуля 6 и аэродинамических рулей 7, чтобы избежать накопления ошибки. Это особенно актуально при наличии фактора случайности. Более того, координация работы всех модулей не всегда возможна на программном уровне прошивки автопилота и возникает потребность упрощения модели управления.

Таким образом, в рассматриваемом случае задача автономной навигации состоит в определении географических координат и истинного курса БПЛА в условии полета без сигнала GPS с использованием данных камеры видеонаблюдения и автоматического управления полетом с учетом этих данных.

Построение модели с помощью алгоритма ASIFT. Видеоряд изображений N кадров с камеры наблюдения задает временной ряд $i_{t_0} \dots i_{t_N}$. Рассмотрим ключевые точки на последовательных кадрах видеоряда i_t, i_{t+1} . Определим аффинное отображение A со строго положительным детерминантом, имеющее однозначное разложение:

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = H_\lambda R_1(\psi) T_t R_2(\varphi) = \\ = \lambda \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix},$$

где $\lambda > 0$, λ — детерминант A ; R_i — повороты камеры под углом $\varphi \in [0, \pi)$; T_t — смещение камеры, представленной диагональной матрицей, имеющей первое собственное число $t > 1$, а второе $t = 1$.

Для нахождения этих матриц используем алгоритм ASIFT [7], позволяющий получить выборку проекций на исходные изображения, полученные при варьировании двух осей координат камеры, а именно углов широты и высоты. При этом используется метод SIFT [8], представляющий собой алгоритм на основе компьютерного зрения, позволяющий находить локальные характеристики изображений, независимые от аффинных преобразований.

Как показано на рис. 2, метод SIFT позволяет дополнить ASIFT, имитируя два параметра, моделирующих направление оптической оси камеры (оригинал и смоделированные изображения представлены соответственно квадратами и параллелограммами). Затем с помощью метода SIFT сравниваются смоделированные изображения. В ASIFT эффективно используются все шесть параметров аффинного преобразования, что позволяет рассматривать и обрабатывать случаи, в которых оригинальный метод SIFT не работает.

Аффинное искажение является ключевой метрикой, определяющей, насколько точно данный алгоритм может восстановить преобразование. В то время как алгоритм SIFT может обработать аффинное искажение размера 2, алгоритмы Harris-Affine и Gesse-Affine — 2,5 [9], алгоритм ASIFT дает адекватные результаты при аффинном искажении в 32 единицы и

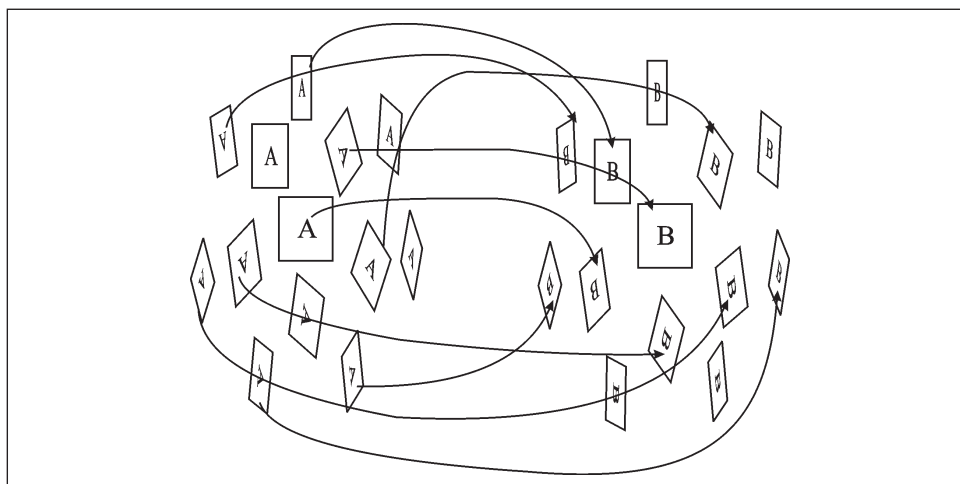


Рис. 2. Схема работы алгоритма ASIFT

выше. Это особенно важно для решения рассматриваемой задачи, так как горизонт камеры наблюдения БПЛА может достаточно резко измениться, например при наборе высоты. В случае, когда изменение угла зрения происходит по нескольким осям, алгоритм ASIFT позволяет корректно обрабатывать входные данные.

Метод SIFT имеет собственный критерий ошибки. Однако, как правило, ошибки 2-го рода пропускаются даже в парах изображений, которые не соответствуют одному и тому же набору ключевых точек. Алгоритм ASIFT, в свою очередь, позволяет сравнивать много пар, вследствие чего может накапливаться много неправильных соответствий, которые необходимо отфильтровать. Важным критерием допустимости соответствия является совместимость эпиполярной геометрии. Проверка допустимости осуществляется следующим образом: пусть есть пара откалиброванных камер (в данном случае два кадра временного ряда) и пусть x — однородные координаты точки из кадра i_t , а x' — из кадра i_{t+1} . Тогда должна существовать матрица F размера 3×3 , такая, что $x'TF x = 0$.

Используем метод ORSA [10], более надежный, чем известная процедура RANSAC [11], для того чтобы избавиться от аномальных точек и локальных несоответствий. В результате остается множество ключевых точек. Затем с помощью аппарата эпиполярной геометрии находим матрицу проективного преобразования на основе ключевых точек, полученных в результате работы алгоритма ASIFT. Каждое изображение i_t преобразуется посредством моделирования всех возможных аффинных искажений,

вызванных оптическим изменением ориентации оси камеры в фронтальном положении. Эти искажения зависят от двух параметров: долготы φ и широты θ . Все смоделированные изображения сравниваются с помощью алгоритма ASIFT, который можно заменить любым другим алгоритмом определения схожести признаков на изображениях.

Задачей моделирования является нахождение матрицы поворота R и смещения T аффинного отображения A .

Моделирование на основе обработки видеоданных. Видеоряд с камеры наблюдения содержит наиболее полную информацию в случае потери GPS сигнала и с учетом данных о скорости и высоте позволяет достаточно точно определить местоположение аппарата. Рассмотрим основные этапы моделирования.

1. *Нахождение шаблонов ключевых точек.* На первом этапе алгоритм работает с двумя (и более) последними кадрами видеоряда, анализируя похожие шаблоны ключевых точек на основе модифицированного ASIFT. Пример соответствия приведен на рис. 3 (см. вклейку), где прямоугольник соответствует проективной матрице, а кругами обозначена найденная ключевая точка.

2. *Нахождение матрицы проективного преобразования.* На этом этапе необходимо вычислить фундаментальную матрицу F , используя, например, алгоритм восьми точек [12]: $E = A'FA$, где A матрица внутренних параметров камеры вида

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь параметры α_x, α_y соответствуют фокусному расстоянию; $\gamma = \alpha_y \tan \varphi$ — угол наклона пикселей; u_0, v_0 — принципиальная точка (точка пересечения плоскости изображения с оптической осью, что совпадает с центром изображения).

3. *Восстановление географических координат объекта.* Для восстановления аффинного преобразования (рис. 4) необходимо разложить E , согласно определению $T_x * R$ с помощью SVD разложения [13] на три матрицы: $E = ULV^{-1}$.

Введем специальную матрицу

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

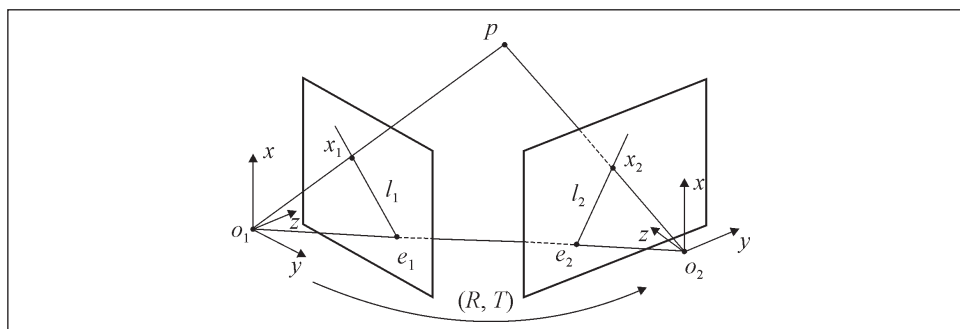


Рис. 4. Изменение позиции ключевой точки при проективном преобразовании матрицами R и T

необходимую для разложения: $R = UW^{-1}V'$. При этом $T_x = UWL U'$,

$$T_x = \begin{pmatrix} 0 & -tx & ty \\ tz & 0 & -tx \\ -ty & tx & 0 \end{pmatrix}.$$

Используя матрицы переноса T и поворота R , можно воссоздать траекторию и скорость движения БПЛА, которая считывается с электронного датчика 3 (см. рис. 1).

Таким образом, модель позиции БПЛА на i -м промежутке имеет вид $X_n^i = T_x * X_n^{i-1}$.

Результаты экспериментального моделирования. При экспериментальном моделировании использована выборка видео, снятых реальными БПЛА (пример видефрагмента приведен на рис. 5 (см. вклейку)). Результаты моделирования достаточно точно совпадают с данными, полученными с GPS навигатора в начале работы алгоритма, но по мере накопления систематической ошибки накапливается прогрессивная погрешность и точность снижается. При существенных погрешностях целесообразно использовать поправки (например, дискретизированные поправки с датчиков для компенсации). При моделировании была использована коррекция прогноза позиции с использованием данных GPS навигатора с дискретизацией 10 с.

Тип навигации	$\overline{\delta}_c, \%$	$\overline{\delta}_{\max}, \%$
IMU + GPS коррекция	13,6	25,1
ASIFT	27,8	26,9
ASIFT + GPS коррекция	12,2	19,8

Результаты экспериментальных исследований для различных типов навигации приведены в таблице, где средняя погрешность для j -го видеофрагмента рассчитана по формуле

$$\delta_c^j = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{|X_{\Pi}^i - X_{\Phi}^i|}{\|X_{\Phi}^i - X_{\Phi}^0\|} 100\%,$$

максимальное значение погрешности прогнозирования — по формуле

$$\delta_{\max}^j = \max \left(\frac{|X_{\Pi}^i - X_{\Phi}^i|}{\|X_{\Phi}^i - X_{\Phi}^0\|} \right).$$

Соответственно

$$\overline{\delta_c} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_c^j, \quad \overline{\delta_{\max}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_{\max}^j.$$

Здесь X_{Π}^i и X_{Φ}^i — прогнозируемое и фактическое значения параметров позиции объекта на i -м кадре видеофрагмента; M — число обработанных в эксперименте видеофрагментов, $M = 17$.

Результаты многочисленных исследований подтверждают целесообразность применения разработанного метода для решения задач автономной навигации, в частности для БПЛА типа «крылья». На рис. 6 (см. вклейку) приведен пример моделирования пути БПЛА.

Выводы

Таким образом, построена модель автономной навигации БПЛА. Разработанные методы и алгоритмы позволяют по серии видеок кадров определять географические координаты и истинный курс БПЛА. Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанный метод автономной навигации с GPS коррекцией более эффективен по сравнению с методом IMU+GPS и имеет более широкую область применения. Данный подход более чувствителен к флуктуациям скорости БПЛА и к ошибке измерения, но в то же время позволяет эффективно решать задачу навигации без наличия GPS сигнала, что имеет практическое значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dufrene Jr W.R.* Application of artificial intelligence techniques in uninhabited aerial vehicle flight // Digital Avionics Systems Conference, 2003. DASC'03. The 22nd // IEEE. — 2003. — Vol. 2 — P. 3—8.
2. *Cir I.* 328 AN/190 // Unmanned Aircraft Systems (UAS) Circular. — 2011.

3. Sukkarieh S., Nebot E.M., Durrant-Whyte H.F. A high integrity IMU/GPS navigation loop for autonomous land vehicle applications // Robotics and Automation. IEEE Transactions. — 1999. — Vol. 15, No. 3. — P. 572—578.
4. Voloshyn D. Kalman filtering methods for eliminating noises in multi-agent system with incomplete information // Theoretical and Applied Aspects of Cybernetics. Proc. of the 2nd International Scientific Conference of Students and Young Scientists — Kyiv: Bukrek, 2012. — 204 p.
5. Sinopoli B., Micheli M., Donato G., Koo T.J. Vision based navigation for an unmanned aerial vehicle // Robotics and Automation, 2001. Proc. 2001 ICRA. IEEE International Conf. — 2001. — Vol. 2. — P. 1757—1764.
6. Samadzadegan F., Hahn M., Saeedi S. Position estimation of aerial vehicle based on a vision aided navigation system // Proc. of Visualization and Exploration of Geospatial Data, Stuttgart. — 2007.
7. Yu G., Morel J.-M. Asift: An algorithm for fully affine invariant comparison // Image Processing On Line. — 2011. — Vol. 1.
8. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features // Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conf. — 1999. — Vol. 2. — P. 1150—1157.
9. Mikolajczyk K., Tuytelaars T., Schmid C. et al A comparison of affine region detectors // International journal of computer vision. — 2005. — Vol. 65, No. 1—2. — P. 43—72.
10. Moisan L., Stival B. A probabilistic criterion to detect rigid point matches between two images and estimate the fundamental matrix // Ibid. — 2004. — Vol. 57, No. 3. — P. 201—218.
11. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. — 1981. — Vol. 24, No. 6. — P. 381—395.
12. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision // Robotica. — 2005. — Vol. 23, No. 2. — P. 271—271.
13. Golub G.H., Reinsch C. Singular value decomposition and least squares solutions // Numerische mathematik. — 1970. — Vol. 14, No. 5. — P. 403—420.

D.V. Voloshyn

MODELLING OF AUTONOMOUS NAVIGATION FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON VIDEO STREAM

The paper considers a problem of autonomous navigation for an unmanned aerial vehicle (UAV). The main steps of the model construction are described and a method for finding its parameters is presented which is based on ASIFT algorithm that uses video stream as input source. The results of experimental simulation of navigation without GPS signal are presented which confirm practical potential of the model implementation.

Key words: autonomous navigation, unmanned aerial vehicle, ASIFT, computer vision.

REFERENCES

1. Dufrene Jr, W.R. (2003), “Application of artificial intelligence techniques in uninhabited aerial vehicle flight”, *The 22nd Digital Avionics Systems Conference DASC'03, IEEE Transactions*, Vol. 2, pp. 3-8.
2. Cir, I. (2011), 328 AN/190, Unmanned Aircraft Systems (UAS) Circular.
3. Sukkarieh, S., Nebot, E.M. and Durrant-Whyte, H.F. (1999), “A high integrity IMU/GPS navigation loop for autonomous land vehicle applications”, *Robotics and Automation. IEEE Transactions*, Vol. 15, no. 3, pp. 572-578.

4. Voloshyn, D. (2012), "Kalman filtering methods for eliminating noises in multi-agent system with incomplete information", *Theoretical and Applied Aspects of Cybernetics, Proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Students and Young Scientists*, Kyiv, Bukrek, 2012, pp. 204-261.
5. Sinopoli, B., Micheli, M., Donato, G. and Koo, T.J. (2001), "Vision based navigation for an unmanned aerial vehicle", *Robotics and Automation, Proceedings of ICRA IEEE International Conference*, Vol. 2, pp. 1757-1764.
6. Samadzadegan, F., Hahn, M. and Saeedi, S. (2007), "Position estimation of aerial vehicle based on a vision aided navigation system", *Proceedings of Visualization and Exploration of Geospatial Data*, Stuttgart, 2007.
7. Yu, G. and Morel, J.-M. (2011), "Asift: An algorithm for fully affine invariant comparison", *Image Processing On Line*, Vol. 1.
8. Lowe, D.G. (1999), "Object recognition from local scale-invariant features", *Computer vision, Proceedings of the 7th IEEE International Conference IEEE 1999*, Vol. 2, pp. 1150-1157.
9. Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid C. and et al. (2005), "A comparison of affine region detectors", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 65, no. 1-2, pp. 43-72.
10. Moisan, L. and Stival, B. (2004), "A probabilistic criterion to detect rigid point matches between two images and estimate the fundamental matrix", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 57, no. 3, pp. 201-218.
11. Fischler, M.A. and Bolles, R.C. (1981), "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", *Communications of the ACM*, Vol. 24, no. 6, pp. 381-395.
12. Hartley, R. and Zisserman, A. (2005), "Multiple view geometry in computer vision", *Robotica*, Vol. 23, no. 2, pp. 271-271.
13. Golub, G.H. and Reinsch, C. (1970), "Singular value decomposition and least squares solutions", *Numerische mathematik*, Vol. 14, no. 5, pp. 403-420.

Поступила 31.03.16;
после доработки 25.04.16

ВОЛОШИН Дмитрий Владимирович, мл. науч. сотр. Ин-та программных систем НАН Украины. В 2011 г. окончил Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко. Область научных исследований — компьютерное зрение, компьютерное моделирование, глубинное обучение.

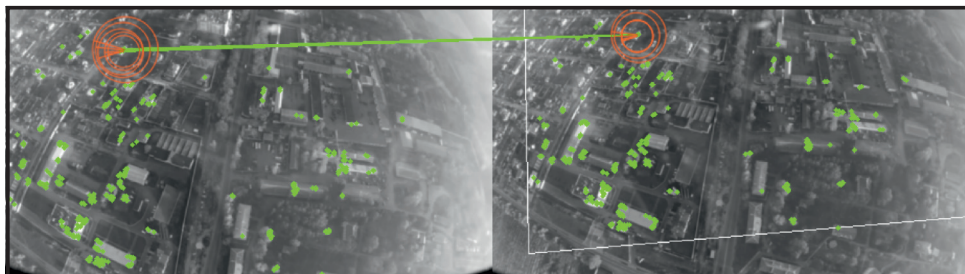


Рис. 3. Найденные ключевые точки между двумя кадрами

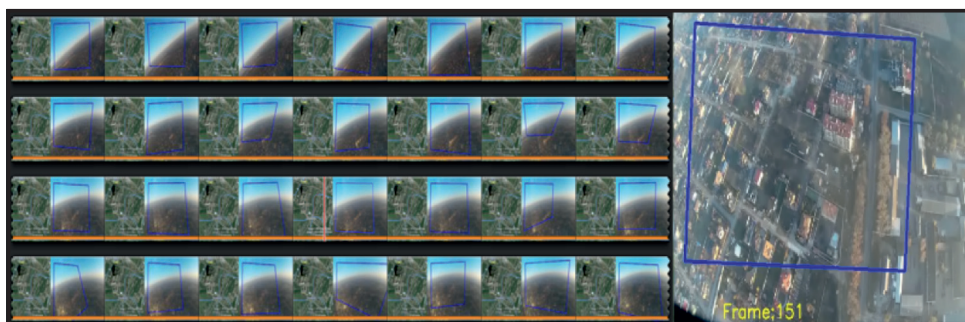


Рис. 5. Раскадровка видеоряда БПЛА



Рис. 6. Реконструкция пути БПЛА по видео: красный цвет — путь, проложенный с использованием ASIFT; синий цвет — фактический путь по данным GPS