

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

УДК 004.021
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-2-17-24>

Поступила в редакцию 15.01.2020
Received 15.01.2020

Принята к публикации 25.02.2020
Accepted 25.02.2020

Визуальная навигация автономно летящего БПЛА с целью его возвращения в точку старта

Р. С. Жук, Б. А. Залеский[✉], Ф. С. Троицкий

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*
[✉]E-mail: zalesky@newman.bas-net.by

Аннотация. Рассматривается алгоритм автономной визуальной навигации, предназначенный для возвращения в точку старта беспилотного летательного аппарата (БПЛА), оборудованного одной бортовой видеокамерой и бортовым вычислителем, без использования навигационных сигналов GPS и ГЛОНАСС. Предлагаемый алгоритм схож с широко известными алгоритмами визуальной навигации, такими как одновременная локализация и картографирование (V-SLAM) и визуальная одометрия, однако отличается от них раздельным выполнением процессов картографирования и локализации. Он вычисляет географические координаты признаков, найденных на кадрах, снятых бортовой видеокамерой при полете от точки старта до потери сигналов GPS и ГЛОНАСС. После потери сигнала запускается миссия возвращения и вычисляется лишь положение БПЛА относительно построенной на основе найденных ранее признаков карты, которая используется для возвращения в точку старта. Предложенный подход не требует таких сложных вычислений, как V-SLAM, и не накапливает со временем ошибки в отличие от визуальной одометрии и традиционных методов инерциальной навигации. Алгоритм был реализован и протестирован с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro.

Ключевые слова: автономная визуальная навигация, беспилотные летательные аппараты, визуальная одометрия, возвращение в точку старта, навигационные сигналы

Для цитирования. Жук, Р. С. Визуальная навигация автономно летящего БПЛА с целью его возвращения в точку старта / Р. С. Жук, Б. А. Залеский, Ф. С. Троицкий // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 17–24. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-2-17-24>

Solution of problem of returning to the starting point of autonomously flying UAV by visual navigation

Raman S. Zhuk, Boris A. Zalesky[✉], Philip S. Trotski

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*
[✉]E-mail: zalesky@newman.bas-net.by

Abstract. An autonomous visual navigation algorithm is considered, designed for “home” return of unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with on-board video camera and on-board computer, out of GPS and GLONASS navigation signals. The proposed algorithm is similar to the well-known visual navigation algorithms such as V-SLAM (simultaneous localization and mapping) and visual odometry, however, it differs in separate implementation of mapping and localization processes. It calculates the geographical coordinates of the features on the frames taken by on-board video camera during the flight from the start point until the moment of GPS and GLONASS signals loss. After the loss of the signal the return mission is launched, which provides estimation of the position of UAV relatively the map created by previously found features. Proposed approach does not require such complex calculations as V-SLAM and does not accumulate errors over time, in contrast to visual

odometry and traditional methods of inertial navigation. The algorithm was implemented and tested with use of DJI Phantom 3 Pro quadcopter.

Keywords: autonomous visual navigation, unmanned aerial vehicles, visual odometry, return to the starting point, navigation signals

For citation. Zhuk R. S., Zalesky B. A., Trotski Ph. S. Solution of problem of returning to the starting point of autonomously flying UAV by visual navigation. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 17–24 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-2-17-24>

Введение. В настоящее время актуальна задача визуальной навигации БПЛА в условиях отсутствия внешних навигационных сигналов GPS или ГЛОНАСС, так как большинство аппаратов оснащается недостаточно точными инерционными датчиками.

Обычно для визуальной навигации используются одна или несколько видеокамер, поэтому в последние несколько десятилетий задача оценки движения камеры в пространстве только по потоку изображений является объектом активных исследований. На сегодняшний день хорошо развиты два подхода к решению этой задачи: V-SLAM [1, 2] и визуальная одометрия [3, 4]. Современные версии упомянутых алгоритмов показывают хорошие результаты и могут работать в реальном времени [5, 6].

Подход V-SLAM основан на идее построения глобальной карты пространственных положений видимых на кадрах видеопотока признаков, согласованной с положениями камеры на протяжении всего времени движения. Он хорошо зарекомендовал себя при навигации в закрытых помещениях и по замкнутым траекториям. Метод визуальной одометрии осуществляет постепенное восстановление траектории (от точки к точке), заботясь только о ее локальной согласованности (о расположении текущей точки траектории относительно предыдущих ее точек в локальной системе координат при неизвестных глобальных координатах), для чего строится лишь локальная карта пространственных положений признаков. Подход V-SLAM гораздо сложнее. Он потенциально более точен, потому что налагает намного больше ограничений на неизвестные положения камеры, но не обязательно более надежен. Например, ошибки при обнаружении точек пересечений траектории могут серьезно повлиять на согласованность всей карты. В случае длинной непересекающейся траектории БПЛА метод V-SLAM не дает преимуществ по сравнению с визуальной одометрией. Очевидным недостатком подхода визуальной одометрии является рост ошибок с течением времени. Самая большая проблема обоих алгоритмов заключается в невозможности оценить масштаб сцены в случае использования лишь одной камеры без дополнительных датчиков.

В последнее время были разработаны несколько оригинальных методов визуально-инерциальной одометрии [7, 8]. В этих методах данные с инерциальных датчиков используются как для уточнения относительных перемещений камеры, так и для определения масштаба сцены. Такие методы сложнее в реализации, чем чисто визуальные, но гораздо точнее и надежнее. Вместе с тем, несмотря на высокую точность, с течением времени они неизбежно накапливают ошибки при полете БПЛА по длинным траекториям.

В настоящей статье представлен метод визуальной навигации, предназначенный для решения задачи возвращения в точку старта БПЛА без использования внешних навигационных сигналов GPS и ГЛОНАСС. Для решения этой задачи строится глобальная карта пространственных положений признаков, видимых на кадрах видеопотока, полученного в то время, когда внешние навигационные сигналы еще присутствуют. После потери сигнала GPS и ГЛОНАСС осуществляется лишь локализация БПЛА относительно построенной карты и возвращение его в точку старта. В результате не производятся сложные вычисления, связанные со взаимным согласованием положений всех признаков с положениями камер. Положение каждого признака вычисляется независимо на основании известных положений камер, в которых он наблюдался. Поскольку глобальная карта построена относительно известных положений камер, дальнейшая визуальная навигация относительно нее осуществляется без накопления ошибок и в известном масштабе.

Предложенный метод был протестирован при помощи квадрокоптера DJI Phantom 3 Pro. Вычислительные эксперименты показали надежность и достаточную точность алгоритма.

Постановка задачи. Рассматривается задача полета БПЛА от точки старта до момента исчезновения используемого навигационного сигнала GPS либо ГЛОНАСС и его возвращения в точку старта в автономном режиме. Во время полета БПЛА от точки старта при наличии навигационного сигнала (до момента его исчезновения) алгоритм строит глобальную карту местности, отображенной бортовой видеочамерой, путем вычисления географических координат особых точек [9], найденных на кадрах. После исчезновения сигнала с помощью этих точек осуществляется навигация БПЛА для его возвращения домой. Для построения глобальной карты местности используются не все кадры, а только так называемые перекрывающиеся ключевые кадры. В алгоритме в качестве ключевого использовался каждый μ -й кадр (с наперед заданным μ). Основное требование при выборе μ заключается в том, что размер в пикселях области, видимой на всех перекрывающихся кадрах, должен быть не меньше заданной части кадра, например четверти, трети и т. д.

Пусть $\Omega = \{I_1, \dots, I_n\}$ – последовательность ключевых кадров, полученных с бортовой камеры БПЛА при полете в условиях присутствия внешних навигационных сигналов GPS или ГЛОНАСС. Для каждого кадра $I_k \in \Omega$ обозначим через T_k и \mathbf{R}_k соответственно вектор перемещения и матрицу поворота, определяющие положение камеры в пространстве относительно неподвижной глобальной системы координат в тот момент, когда был сделан кадр I_k . Точка π на кадре I_k , соответствующая 3D-точке $X = (x, y, z)$ в пространстве с проективными координатами $\tilde{X} = (x, y, z, 1)$, которая является функцией от переменных $\mathbf{R}_k, T_k, \tilde{X}$, определяется согласно выражению [10]

$$\pi(\mathbf{R}_k, T_k, \tilde{X}) = \frac{1}{z} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{R}_k \cdot (\mathbf{I}, -T_k) \cdot \tilde{X},$$

где \mathbf{K} – калибровочная матрица бортовой камеры БПЛА, \mathbf{I} – единичная матрица.

Описание алгоритма автономной визуальной навигации. Предложенный алгоритм визуальной навигации состоит из трех больших блоков шагов. На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма, на которой первый блок шагов обведен зеленой, второй – синей, а третий – оранжевой рамками.

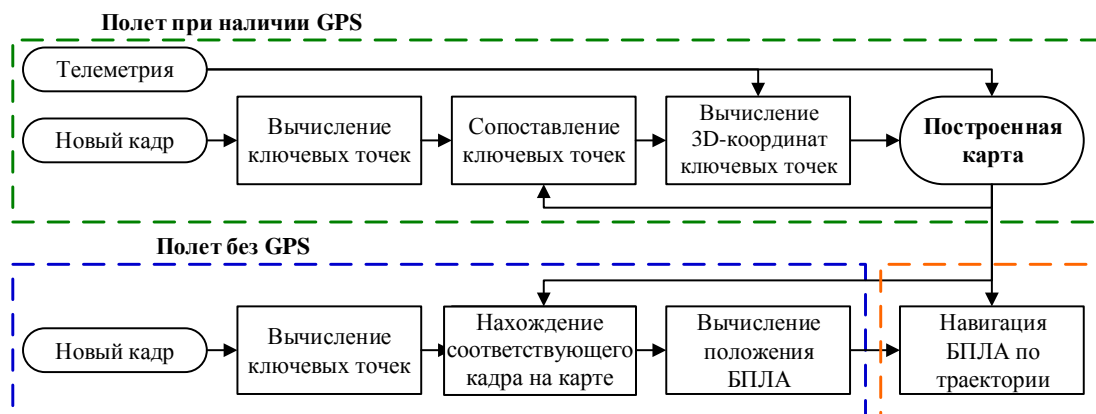


Рис. 1. Блок-схема алгоритма автономной визуальной навигации

Задачей первого блока алгоритма является определение для каждого кадра $I_k \in \Omega$ пространственных координат точек ландшафта $\mathbf{X}^k = \{X_1^k, X_2^k, \dots\}$, соответствующих найденным на нем особым точкам $\mathbf{u}^k = \{u_1^k, u_2^k, \dots\}$.

Для нахождения ключевых точек на кадрах использовались как известные детекторы особых точек SURF, SIFT, AKAZE, так и специально разработанный детектор экстремальных моментов EMD [9]. Проведенные эксперименты показали, что детекторы SURF и EMD обеспечивают нахождение большего количества информативных ключевых точек и поэтому лучше подходят для решения рассматриваемой задачи.

Основным этапом первого блока алгоритма является нахождение множества 3D-точек ландшафта $\Theta = \{X_1, \dots, X_m\}$, видимых на нескольких ключевых кадрах. Вначале на каждом новом кадре I_k ищутся ключевые точки \mathbf{u}^k , которые сопоставляются с ключевыми точками \mathbf{u}^{k-1} с предыдущего шага. Далее для каждой сопоставленной пары ключевых точек $\{u_i^{k-1}, u_j^k\}$ точке u_j^k ставится в соответствие точка X_l , если ранее уже было установлено соответствие между X_l и u_i^{k-1} , либо обоим ключевым точкам ставится в соответствие новая 3D-точка, которая добавляется в множество Θ . В результате для каждой 3D-точки $X_l \in \Theta$ формируется набор ключевых точек $\mathbf{U}^l = \{u_i^s, \dots, u_j^d\}$ из некоторого количества ключевых кадров множества Ω , а также для каждого кадра I_k – набор 3D-точек $\hat{\mathbf{X}}^k = \mathbf{X}^k \cap \Theta$, которым поставлены в соответствие некоторые ключевые точки из \mathbf{u}^k . После этого каждая точка X_l находится из условия

$$\begin{cases} \pi(\mathbf{R}_s, T_s, \tilde{X}_l) - \tilde{u}_i^s = 0, \\ \vdots \\ \pi(\mathbf{R}_d, T_d, \tilde{X}_l) - \tilde{u}_j^d = 0, \end{cases}$$

где \tilde{u}_i^s , \tilde{u}_j^d и \tilde{X}_l – проективные координаты точек u_i^s , u_j^d и X_l соответственно.

Чтобы повысить точность вычисления координат точек множества Θ в более поздней версии алгоритма, была использована усложненная схема сопоставления ключевых точек на кадрах, в которой ключевые точки нового кадра \mathbf{u}^k сопоставлялись с ключевыми точками нескольких предыдущих кадров. В результате был получен надежный метод отслеживания точек ландшафта на ключевых кадрах, которые брались с довольно большим шагом по времени.

Для нахождения координат точек \mathbf{X}^k , соответствующих ключевым точкам каждого кадра $I_k \in \Omega$, сначала оценивались параметры 3D-поверхности первого или второго порядка, аппроксимирующей рельеф, путем приближения точек из $\hat{\mathbf{X}}^k$, после чего находились X_i^k как точки пересечения луча, выходящего из оптического центра камеры и проходящего через u_i^k с найденной 3D-поверхностью.

Второй блок шагов алгоритма автономной визуальной навигации предназначен для нахождения пространственных координат камеры БПЛА во время автономного полета.

Пусть I^t – кадр, полученный при возвращении БПЛА в точку старта. Необходимо вычислить вектор трансляции T^t и матрицу поворота \mathbf{R}^t камеры в момент времени t . Для этого следует найти сначала особые точки \mathbf{u}^t на кадре I^t , а затем полученный при полете от точки старта при наличии навигационных сигналов кадр $I(t) \in \Omega$, между ключевыми точками которого и \mathbf{u}^t удастся найти достаточное количество соответствий. В качестве начального кадра для поиска $I(t)$ берется либо $I(t-1) \in \Omega$ (кадр, обнаруженный на предыдущем шаге), либо послед-

ний кадр Ω , если I^t – первый кадр, полученный при условии отсутствия сигналов GPS или ГЛОНАСС.

Пусть далее $I(t) = I_k$, а $\tilde{\mathbf{u}}^t$ и $\tilde{\mathbf{u}}^k$ – два набора соответствующих друг другу проективных координат особых точек из I^t и I_k , $\tilde{\mathbf{X}}^k$ – набор проективных координат 3D-точек ландшафта, которые соответствуют $\tilde{\mathbf{u}}^k$. Тогда \mathbf{R}^t можно найти при помощи восьмиточечного [11] либо пятиточечного [12] алгоритма, используя только $\tilde{\mathbf{u}}^t$ и $\tilde{\mathbf{u}}^k$, после чего вектор сдвига T^t находится следующим образом:

$$T^t = \operatorname{argmin}_T \sum_i \left\| \tilde{\mathbf{u}}_i^t - (\mathbf{R}^t, T, \tilde{\mathbf{X}}_i^k) \right\|^2.$$

Третий блок алгоритма в каждый момент времени t , когда получена новая оценка T^t положения БПЛА, находит новый вектор D^t направления движения БПЛА, чтобы осуществить его полет к точке старта вдоль сохраненной траектории $\mathbf{T} = \{T_1, \dots, T_n\}$ полета летательного аппарата от точки старта. Эта простая на первый взгляд задача не является тривиальной в случае запутанного маршрута БПЛА (рис. 2).

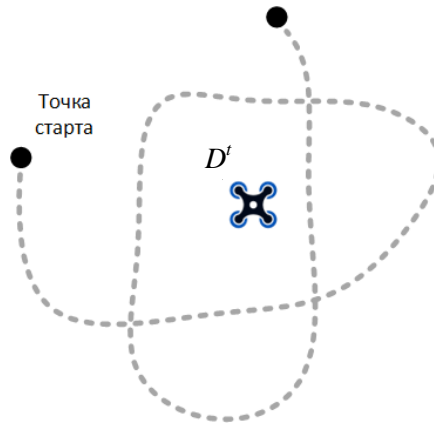


Рис. 2. Пример запутанного маршрута БПЛА

В рассматриваемом алгоритме направление движения на каждом шаге определяется как $D^t = T(t) - T^t$, где $T(t)$ – некоторая специально выбранная точка на траектории \mathbf{T} . Для ее выбора находится T_k – ближайшая точка на траектории \mathbf{T} к позиции T^t , а затем для некоторого наперед заданного расстояния L (в экспериментах были использованы значения от 5 до 20 в зависимости от скорости БПЛА и сложности маршрута) проверяется условие $\|T_k - T^t\| > L$. Если условие выполняется, то $T(t) = T_k$. В противном случае ищется минимальное число l , для которого выполняется условие $\|T_{k-l} - T^t\| > L$, и точка $T(t)$ полагается равной $T(t) = T_{k-l+1}$.

В случае сложной траектории \mathbf{T} может получиться так, что $T(t) = T_i$, а $T(t-1) = T_j$, где $i > j$. Тогда для предотвращения закливания полета необходимо положить $T(t) = T(t-1)$.

Достаточно большое количество экспериментов показало применимость разработанного подхода.

Описание и результаты экспериментов. Для тестирования алгоритма визуальной навигации был использован квадрокоптер DJI Phantom 3 Pro. Так как он не оборудован бортовым компьютером, для проведения испытаний было разработано экспериментальное программное обеспечение, которое позволяло осуществлять управление квадрокоптером с помощью персонального компьютера, а также получать с квадрокоптера телеметрию и видео. Было проведено большое количество экспериментов, в каждом из которых согласно предложенному алгоритму во время полета от точки старта оценивались и сохранялись 3D-координаты точек ландшафта, соответствующие особым точкам на ключевых кадрах, которые брались с определенным шагом.

После достижения БПЛА конечной точки маршрута его координаты оценивались с помощью алгоритма в автономном режиме (без использования данных GPS и ГЛОНАСС), и на основе построенных оценок координат осуществлялось возвращение аппарата в начальную точку. Для повышения стабильности автономного полета БПЛА был использован линейный фильтр Калмана.

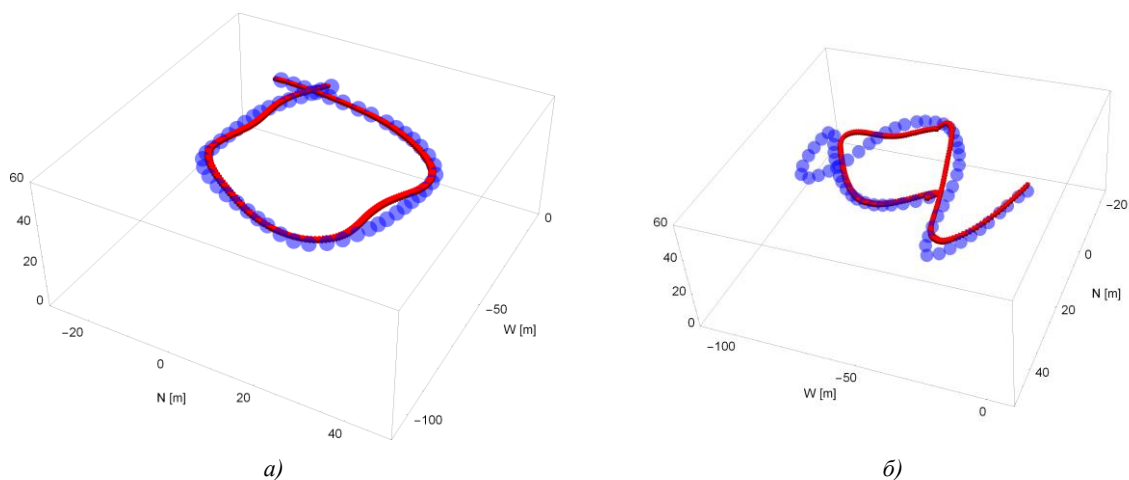


Рис. 3. 3D-реконструкции простых (а) и сложных (б) траекторий экспериментальных полетов БПЛА

На рис. 3 показаны 3D-реконструкции траекторий некоторых из экспериментальных полетов БПЛА, где синим цветом отображена траектория полета от точки старта, а красным – траектория автономного возвращения аппарата в точку старта. На рис. 3, б видно, что алгоритм предотвратил зацикливание траектории на этапе возвращения БПЛА в точку старта при наличии петли в траектории полета от точки старта. Оценки точности вычисления координат алгоритмом во время автономных полетов квадрокоптера приведены в таблице.

Результаты экспериментов, м

Длина маршрута	Высота над уровнем моря	Средняя ошибка с фильтром Калмана	Средняя ошибка без фильтра Калмана	Стандартное отклонение с фильтром Калмана	Стандартное отклонение без фильтра Калмана
200	46	1,43	0,88	0,73	0,45
215	65	2,04	1,15	1,05	0,58
230	46	2,58	1,06	1,47	0,60
261	50	2,11	2,87	1,87	1,76
285	61	0,86	2,29	0,79	2,01
294	46	6,29	4,04	7,78	7,53
300	49	0,17	3,19	0,25	3,06
305	46	2,79	0,94	1,62	0,43
340	65	2,03	1,56	1,89	0,92
481	46	3,66	2,66	5,21	5,01
591	63	0,31	2,47	0,50	2,91
700	49	0,50	2,62	1,82	3,70
1040	61	2,90	4,50	5,34	6,83

Средняя ошибка оценки глобальных координат автономно летящего БПЛА, измеренная по всем экспериментальным маршрутам, составляет 2,07 м. Следует отметить, что величина ошибки не увеличивается со временем, поскольку оценки координат во время автономного полета вычисляются независимо друг от друга.

Заключение. Предложенный алгоритм позволяет вернуть потерявший внешние навигационные сигналы БПЛА в точку старта на основе сохраненных во время полета визуальных признаков. Он отличается простотой и надежностью. Величина погрешности оценки траектории, построенной разработанным алгоритмом, не возрастает в отличие от погрешности оценки траектории алгоритмами инерциальной навигации.

Недостатком предложенного авторами подхода к решению поставленной задачи автономного возвращения в точку старта является необходимость пролета по всему маршруту, проделанному БПЛА до момента потери внешних навигационных сигналов. Этот недостаток можно устранить путем добавления возможности срезать траекторию, для чего необходимо будет некоторое время лететь над неизвестным ландшафтом. Указанную возможность может обеспечить добавление в предложенную систему модулей, реализующих известные алгоритмы визуальной навигации, такие как V-SLAM и визуальная одометрия.

Список использованных источников

1. Durrant-Whyte, H. Simultaneous localization and mapping: part I / H. Durrant-Whyte, T. Bailey // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. – 2006. – Vol. 13, no. 2. – P. 99–110.
2. Bailey, T. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II / T. Bailey, H. Durrant-Whyte // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. – 2006. – Vol. 13, no. 3. – P. 108–117.
3. Scaramuzza, D. Visual odometry [tutorial]. Part I: The first 30 years and fundamentals / D. Scaramuzza, F. Fraundorfer // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. – 2011. – Vol. 18, no. 4. – P. 80–92.
4. Fraundorfer, F. Visual odometry: part II: matching, robustness, optimization, and applications / F. Fraundorfer, D. Scaramuzza // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. – 2012. – Vol. 19, no. 2. – P. 78–90.
5. SVO: semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems / C. Forster [et al.] // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2017. – Vol. 33, no. 2. – P. 249–265.
6. Efficient on-board Stereo SLAM through constrained-covisibility strategies / G. Castro [et al.] // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2019. – Vol. 116. – P. 192–205.
7. Qin, T. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator / T. Qin, P. Li, S. Shen // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2017. – Vol. 34, no. 4. – P. 1004–1020.
8. VIMO: simultaneous visual inertial model-based odometry and force estimation / B. Nisar [et al.] // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2019. – Vol. 4, no. 3. – P. 2785–2792.
9. Залесский, Б. А. Параллельная версия детектора экстремальных особых точек изображений / Б. А. Залесский, Ф. С. Троцкий // *Информатика*. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 55–63.
10. Форсайт, Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. А. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Вильямс, 2004. – С. 76–77.
11. Hartley, R. I. In defense of the eight-point algorithm / R. I. Hartley // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1997. – Vol. 19, no. 6. – P. 580–593.
12. Nister, D. An efficient solution to the five-point relative pose problem / D. Nister // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2004. – Vol. 26, no. 6. – P. 756–770.

References

1. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, vol. 13, no. 2, pp. 99–110.
2. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, vol. 13, no. 3, pp. 108–117.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [tutorial]. Part I: The first 30 years and fundamentals. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 80–92.
4. Fraundorfer F., Scaramuzza D. Visual odometry: part II: matching, robustness, optimization, and applications. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 78–90.
5. Forster C., Zhang Z., Gassner M., Werlberger M., Scaramuzza D. SVO: semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, vol. 33, no. 2, pp. 249–265.

6. Castro G., Nitsche M., Pire T., Fischer T., De Cristóforis P. Efficient on-board Stereo SLAM through constrained-covisibility strategies. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, vol. 116, pp. 192–205.
7. Qin T., Li P., Shen S. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, vol. 34, no. 4, pp. 1004–1020.
8. Nisar B., Foehn P., Falanga D., Scaramuzza D. VIMO: simultaneous visual inertial model-based odometry and force estimation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 2785–2792.
9. Zalesky B. A., Trotski Ph. S. Parallelnaja versija detektora jekstremal'nyh osobyh toчек izobrazhenij [Parallel version of detector of extremal key points on images]. *Informatika [Informatics]*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 55–63 (in Russian).
10. Forsyth D. A., Ponce J. *Computer Vision: a Modern Approach*. Prentice Hall, 2003, 693 p.
11. Hartley R. I. In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, vol. 19, no. 6, pp. 580–593.
12. Nister D. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, vol. 26, no. 6, pp. 756–770.

Информация об авторах

Жук Роман Сергеевич, младший научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.

E-mail: ramanzhuck@gmail.com

Залесский Борис Андреевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией обработки и распознавания изображений, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.

E-mail: zalesky@newman.bas-net.by

Троцкий Филипп Сергеевич, младший научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.

E-mail: trotskiphilipp@gmail.com

Information about the authors

Raman S. Zhuk, Junior Researcher, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.

E-mail: ramanzhuck@gmail.com

Boris A. Zalesky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Image Processing and Recognition, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.

E-mail: zalesky@newman.bas-net.by

Philip S. Trotski, Junior Researcher, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.

E-mail: trotskiphilipp@gmail.com