

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Мамедов И.Э.

*Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана,
ул. Ахундова Сулеймана Сани, 1, Баку, AZ1115, Азербайджанская Республика
e-mail: i.mamedov09@gmail.com*

Предлагается метод локализации беспилотного летательного аппарата (БПЛА), где локализация осуществляется как на основе информационных характеристик, так и оптических характеристик освещенности рассматриваемых изображений. При этом схожесть реальной сцены и геореференцированного изображения вычисляется путем вычитания их информационных характеристик. Для повышения точности и надежности получаемого результата локализация реализуется с применением оптимизационной процедуры на основе предложенного интегрального информационного критерия. Вычислен оптимальный режим реализации предложенного метода.

Ключевые слова: локализация, БПЛА, интегральный информационный критерий, функционал цели, безусловная вариационная оптимизация.

Введение

Хорошо известно, что беспилотные летательные аппараты в настоящее время весьма широко используются в разведывательных целях. Одним из основных факторов, способствующих успешному выполнению разведывательных задач БПЛА, является возможность точной локализации их местонахождения. Для решения задач локализации могут быть использованы визуально-фотометрические системы [1–5] совместно с инерциальными системами или GPS. Согласно [6] основой локализации беспилотных летательных аппаратов являются технологии обнаружения и оценки координат, базирующиеся на автоматической обработке и анализе видеоинформации. Как отмечается в [7], локализация БПЛА позволяет более точно планировать маршрут и принимать соответствующие решения. При функционировании БПЛА вне помещений основным источником данных о собственном месторасположении является GPS/ГЛОНАСС. Также распространен подход в локализации, заключающийся в использовании визуальной информации, получаемой с камеры БПЛА. Согласно [8] проблема навигации БПЛА в труднопроходимых зонах может быть решена путем предварительного фотографирования этой зоны БПЛА, передачи изображений на наземное устройство, которое вычисляет оптимальный маршрут прохождения зоны и посылает дорожную

карту БПЛА. В [9] отмечается, что для решения задач реализации БПЛА используются датчики инерциальной навигационной системы — акселерометры, гироскопы, приемники GPS/ГЛОНАСС, оптические датчики, ИК-датчики, лазерные дальнометры и т.д. При этом также может быть использован метод картирования и локализации по видеопотоку, полученному с единственной камеры. Согласно [10] использование единственной камеры приводит к таким проблемам, как построение модели неизвестной местности по нескольким кадрам видеопотока, локализация системы в построенной модели, корректировка пройденной траектории и т.д. Успешное решение задач локализации БПЛА является важнейшим условием повышения эффективности системы мониторинга на базе группы беспилотных летательных аппаратов [11]. Согласно [12, 13], задача наведения БПЛА на подвижную цель путем решения задачи облета заданного набора навигационных точек неразрывно связана с предварительной точной локализацией беспилотных летательных аппаратов. Использование систем технического зрения БПЛА в целях мониторинга наблюдаемой сцены и дальнейшей классификации исследуемых ситуаций предусматривает исходную локализацию беспилотного аппарата и дальнейшую классификацию наблюдаемой сцены с использованием семантических описаний. С учетом вышеиз-

ложенного можно заключить, что разработка новых, высокоэффективных информационных методов локализации БПЛА является достаточно актуальной задачей.

Постановка задачи

В работах [14—17] рассматриваются системы локализации, где используются геореференцированные изображения путем их сравнения с изображениями, полученными от бортовой камеры.

В этих системах оценка позиции БПЛА обычно осуществляется с использованием таких признаков, как опорные точки, края или другие информативные элементы изображений. Однако такие признаки очень чувствительны к условиям освещения объектов на поверхности Земли и метеоситуации. В [18] предлагается осуществление локализации путем вычисления функции схожести между изображением, выданным бортовой камерой, и опорным геореференцированным изображением. В этой работе предложено использовать в качестве критерия квадратичную функцию разности освещенности каждого пикселя. Однако результаты, полученные в этом методе, оказываются чувствительными к сезонным и погодным условиям. В [19, 20] предложено использование такой характеристики, как взаимная информация. Основным недостатком метода является сложность вычисления этой функции в масштабе реального времени.

В настоящей статье предлагается метод, обобщающий основные черты вышеизложенных способов локализации. В предлагаемом методе:

- локализация осуществляется на основе как информационных характеристик, так и оптических характеристик освещенности, рассматриваемых разноформатных изображений;

- схожесть реальной сцены и геореференцированного изображения вычисляется путем вычитания их информационных характеристик;

- для повышения точности и надежности получаемого результата локализация реализуется на основе разноформатных геореференцированных изображений объекта.

В результате обработки полученной информации осуществляется 2D-трансформация данных как геореференцированного изображения, так и текущего изображения, получаемого от камеры. На основе такой информации определяется относительный сдвиг и поворот текущей позиции камеры от позиции камеры при формировании геореференцированного изображения.

Материалы и методы (теоретические основы)

В предлагаемом методе проблема локализации решается как задача минимизации разности суммарных количеств информации, полученных от реального объекта и опорного изображения в режиме исследования разноформатных кадров при выполнении некоторого дополнительного условия, задаваемого на суммарную освещенность исследуемых и сравниваемых изображений. В частном случае, если сравниваются изображения с количеством пикселей N , то исследуется разность

$$\Delta M_i = N \cdot \log_2 \psi_2 - N \cdot \log_2 \psi_1, \quad (1)$$

где ψ_2 — отношение сигнал/шум в канале формирования изображения реального объекта;

ψ_1 — отношение сигнал/шум в канале формирования образа геореференцированного изображения.

Далее считаем, что $\psi_1 \gg 1$; $\psi_2 \gg 1$.

Если принять, что при локализации используются разноформатные изображения, количество элементов (пикселей) которых составляет множество

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}, \quad (2)$$

где

$$N_i = N_{i-1} + \Delta N; \Delta N = \text{const}, \quad (3)$$

то выражение (1) примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n \Delta M_i = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \log_2 \psi_2 - \sum_{i=1}^n N_i \cdot \log_2 \psi_1. \quad (4)$$

Вышеупомянутое дополнительное условие имеет вид

$$\sum_{i=1}^n \psi_2 = C; C = \text{const}. \quad (5)$$

Задача локализации в дискретном виде на основе выражений (4) и (5) выражается следующим образом:

1. Допускается наличие функциональных связей:

$$\psi_1 = \psi_1(N); \quad (6)$$

$$\psi_2 = \psi_2(N). \quad (7)$$

2. Считается, что функция $\psi_1(N)$ является фиксированной и неизменной.

3. Требуется вычислить такую оптимальную функцию $\psi_2(N)$, при которой нижеуказанный функционал цели достигает минимума:

$$F = \min_{\{\psi_1(N)\}} \left\{ \sum_{i=1}^n \Delta M_i \right\} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \log_2 \psi_2(N) - \sum_{i=1}^n N_i \cdot \log_2 \psi_1(N) + \lambda \left[\sum_{i=1}^n \psi_2(N) - C \right], \quad (8)$$

где λ — множитель Лагранжа.

С учетом условий (2), (3) выражения (5) и (8), умноженные на ΔN , могут быть записаны в условно непрерывном виде.

Переход от дискретной суммы (8), умноженной на ΔN , к непрерывной форме записи в задаче отыскания оптимума безусловно приводит к появлению некоторой погрешности (рис. 1) в оценке функционала F . Вместе с тем, очевидно, что с увеличением значения n эта погрешность будет уменьшаться и появится возможность более точно определить оптимальную функцию $\psi_2(N)$.

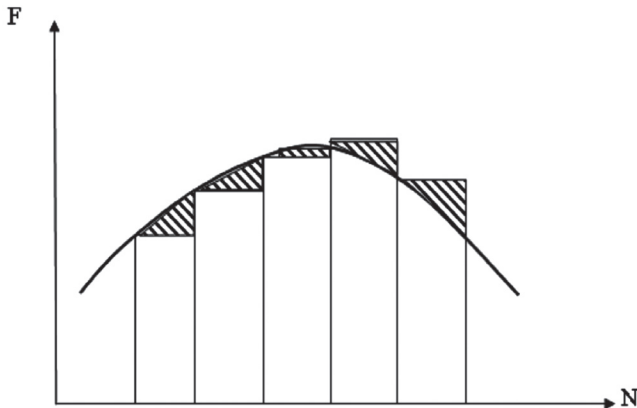


Рис. 1. Графическая иллюстрация перехода от дискретной суммы к непрерывной форме записи. Заштрихованные области соответствуют участкам появления погрешности аппроксимации непрерывной линии ступенчатой функцией

Выражение (5) может быть записано в виде

$$\int_1^N \psi_1(N) dN = C; C = \text{const}, \quad (9)$$

а выражение (8) — как

$$F = \int_1^{N^m} N \log_2 \psi_2(N) dN - \int_1^{N^m} N \log \psi_1(N) dN + \lambda \left[\int_1^{N^m} \psi_2(N) dN - C \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) запишем в компактном виде:

$$F = \int_1^{N^m} N \log_2 \frac{\psi_2(N)}{\psi_1(N)} dN + \lambda \left[\int_1^{N^m} \psi_2(N) dN - C \right]. \quad (11)$$

Согласно уравнению Эйлера—Лагранжа оптимальная функция $\psi_1(N)$, приводящая функционал F к его минимальному значению, должна удовлетворять условию

$$\frac{d \left\{ N \log_2 \frac{\psi_2(N)}{\psi_1(N)} + \lambda \cdot \psi_2(N) \right\}}{d\psi_2(N)} = 0, \quad (12)$$

откуда получаем:

$$\frac{N}{(\ln 2) \cdot \psi_2(N)} + \lambda = 0. \quad (13)$$

Из (13) находим

$$\psi_2(N) = -\frac{N}{(\ln 2) \cdot \lambda}. \quad (14)$$

Из (9) и (13) получим

$$-\int_1^{N^m} \frac{N}{(\ln 2) \cdot \lambda} dN = C. \quad (15)$$

С учетом (15) имеем

$$\lambda = -\frac{1}{2C \cdot (\ln 2)} \left[1 - N_m^2 \right]. \quad (16)$$

Из (13) и (16) получим

$$\frac{N}{(\ln 2) \cdot \psi_2(N)} = \frac{[N_m^2 - 1]}{2C \cdot (\ln 2)}. \quad (17)$$

Из выражения (17) находим

$$\psi_2(N) = \frac{2C \cdot N}{N_m^2 - 1}. \quad (18)$$

Для определения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта (т.е. подынтегральной функции) в функционале (11) по $\psi_2(N)$ и убедиться, что она с учетом решения (18) всегда отрицательна. Следовательно, функционал цели (11) при решении (18) достигает своего максимума. Блок-схема алгоритма предлагаемого метода приведена на рис. 2.

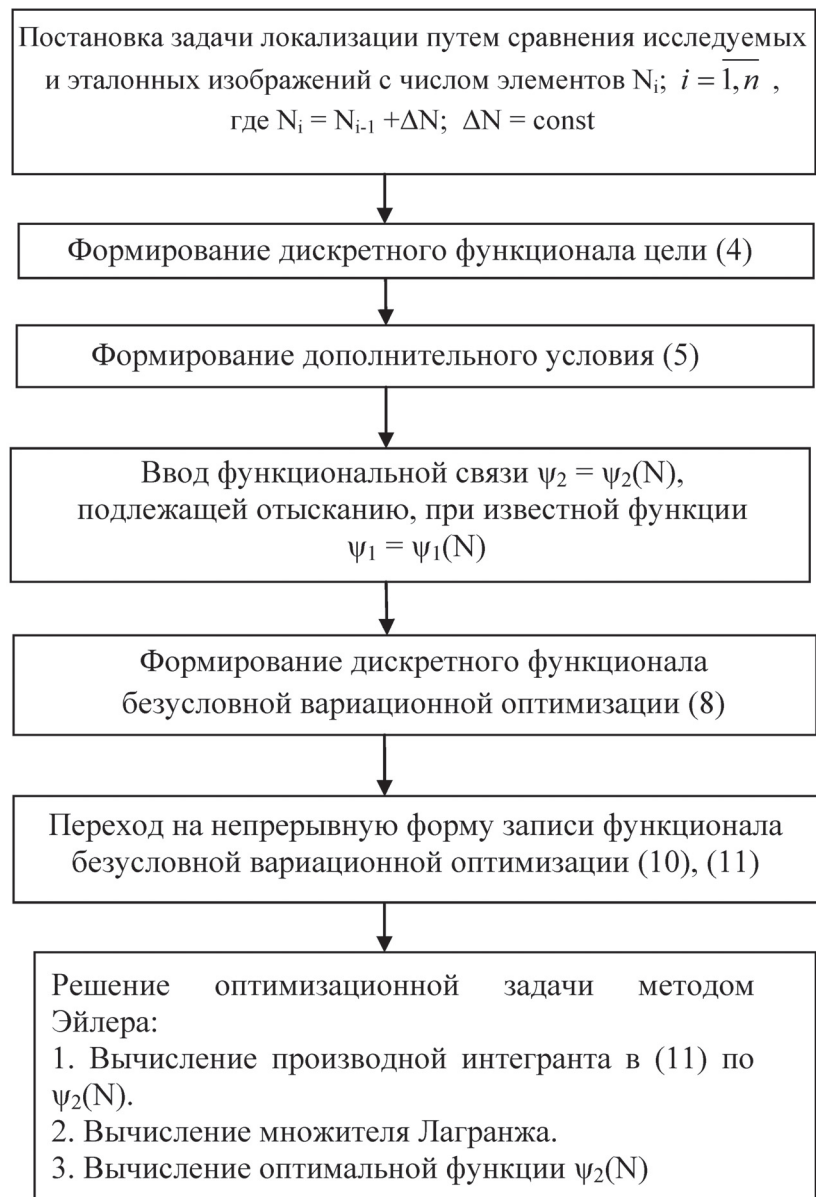


Рис. 2. Блок-схема алгоритма предлагаемого метода

Результаты и обсуждения

Применительно к рассматриваемой задаче локализации позиции БПЛА полученное решение (18) можно трактовать следующим образом:

Так как решение (18) обеспечивает максимальное расхождение оценок количества информации в изучаемой наземной сцене и геореференцированном изображении, то оптимальным выбором следует считать такую функциональную зависимость $\psi_2(N)$, которая более других отличается от функции (18). Например, такой функциональной зависимостью может стать функция, инверсная в отношении выражения (18), имеющая вид

$$\psi_2(N)_{opt} = A - \psi_2(N), \quad (19)$$

где $A = \text{const}$.

В принципе, в выборе $\psi_2(N)_{opt}$ можно предложить большое количество различных функций, противоположных по динамике функции $\psi_2(N)$. Окончательный выбор наиболее эффективной функции может быть осуществлен на базе проводимых экспериментальных исследований по локализации позиции БПЛА.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Предложен визуально-фотометрический метод локализации БПЛА на основе интегрального информационного критерия.

2. Вычислен оптимальный режим реализации предложенного метода.

Библиографический список

1. *Ahrens S., Levine D., Andrews G., How J.P.* Vision-based guidance and control of a hovering vehicle in unknown, GPS-denied environments // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'09), Kobe, Japan. 2009, pp. 2643-2648, DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152680
2. *Caballero F., Merino L., Ferruz J., Ollero A.* Vision-based odometry and SLAM for medium and high altitude flying UAVs // Unmanned Aircraft Systems: International Symposium On Unmanned Aerial Vehicles (UAV'08), 2009, pp. 137-161. DOI 10.1007/978-1-4020-9137-7_9
3. *Artieda J., Sebastian J.M., Campoy P., Correa J.F., Mondragón I.F., Martínez C., Olivares M.* Visual 3-D SLAM from UAVs // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2009. Vol. 55. No. 4-5, pp. 299-321. DOI: 10.1007/s10846-008-9304-8
4. *Blösch M., Weiss S., Scaramuzza D., Siegwart R.* Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'10). 2010, pp. 21-28. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509920
5. *Kim J.H., Sukkarieh S.* Airborne simultaneous localisation and map building // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), Taipei, Taiwan. 2003. Vol. 1, pp. 406-411. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241629
6. *Ким Н.В., Бодунков Н.Е., Крылов И.Г.* Поиск наземных объектов беспилотными летательными аппаратами // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)»: Труды семинара. — СПб.: Политехника-сервис, 2015. С. 42-49.
7. *Буйвал А.К.* Локализация беспилотного летательного аппарата внутри помещений на основе визуальных геометрических признаков и известной 3D модели окружающей среды // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)»: Труды семинара. — СПб.: Политехника-сервис, 2015. С. 10-17.
8. *Афанасьев И.М., Сагитов А.Г., Данилов И.Ю., Магид Е.А.* Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D симуляторе GAZEBO методом вероятностной дорожной карты // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)»: Труды семинара. — СПб.: Политехника-сервис, 2015. С. 18-25.
9. *Боковой А.В.* Исследование методов одновременного картирования и локализации беспилотных летательных аппаратов по видеопотоку, полученному с единственной камеры // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)»: Труды семинара. — СПб.: Политехника-сервис, 2015. С. 26-33.
10. *Lemaire T., Berger C., Jung I., Lacroix S.* Vision-Based SLAM: Stereo and Monocular Approaches // International Journal of Computer Vision. 2007. Vol. 74. No. 3, pp. 343-364. DOI: 10.1007/s11263-007-0042-3
11. *Максимов Н.А., Склеймин Ю.Б., Шаронов А.В.* Модель для оценки эффективности системы мониторинга с использованием группы беспилотных летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 30-39.
12. *Грумандз В.Т., Полищук М.А.* Задача наведения беспилотного планирующего летательного аппарата на подвижную цель // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 4. С. 7-12.
13. *Conte G., Doherty P.* An integrated UAV navigation system based on aerial image matching // IEEE Aerospace Conference, 2008, Big Sky, MT, USA, pp. 3142-3151. DOI: 10.1109/AERO.2008.4526556
14. *Saripalli S., Montgomery J.F., Sukhatme G.S.* Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle // IEEE Robotics and Automation Society, 2003. Vol. 19. No. 3, pp. 371-380. DOI: 10.1109/TRA.2003.810239
15. *Ganesan A., Gireesh Kumar R.N.* Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle // Procedia Engineering. 2012. Vol. 38, pp. 2250-2256. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.271
16. *Anitha G., Gireesh Kumar R.N.* Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle // Procedia Engineering. 2012. Vol. 38, pp. 2250-2256. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.271
17. *Sim D.-G., Park R.-H., Kim R.-Ch., Lee S. U., Kim I.-Ch.* Integrated position estimation using aerial image sequences // IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 2002. Vol. 24. No. 1, 18 p. DOI: 10.1109/34.982881
18. *Martínez C., Mondragón I.F., Campoy P., Sánchez-López J.L., Olivares-Méndez M.A.* A hierarchical tracking strategy for vision-based applications on-board UAVs // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2013. Vol. 72. No. 3-4, pp. 517-539. DOI: 10.1007/s10846-013-9814-x
19. *Dame A., Marchand E.* Second-order optimization of mutual information for real-time image registration // IEEE Image Processing. 2012. Vol. 21. No. 9, pp. 4190-4203. DOI: 10.1109/TIP.2012.2199124
20. *Viola P., Wells W.* Alignment by maximization of mutual information // International Journal of Computer Vision. 1997. Vol. 24. No. 2, pp. 137-154. DOI: 10.1109/ICCV.1995.466930

PHOTOMETRIC INFORMATIONAL METHOD FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES LOCALIZATION

Mamedov I.E.

*National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic,
NASA, 1, Suleyman Sani Akhundov str., Baku, AZ1115, Azerbaijan Republic
e-mail: i.mamedov09@gmail.com*

Abstract

One of major factors affecting the successful UAV performing reconnaissance tasks is the possibility of its coordinates' exact localization. The UAV position estimation in such systems is usually performed employing such features as reference points, margins or other images' informative elements. Application of such characteristic as reciprocal information for this purpose is also possible. The major shortage of these methods consist in complexity of this function computation in real time scale. The presented article suggests the method, generalizing the main features of localization techniques based on reciprocal information calculation. In contrast to the well-known solutions, localization with the suggested technique is performed based on both information characteristics and optical illuminance characteristics of the analyzed images of various formats. The resemblance of real scene herewith with geo-referenced image is computed by subtracting them from the information characteristics, and for accuracy and reliability of the obtained result, the localization is performed based on multi-format geo-referenced images of the object. The localization problem is solved with this method as a problem of minimization of difference of the total volumes of information, obtained from the real object and reference image in the mode of studying the multi-format frames while meeting some additional condition, specified on total illuminance of the studied and compared images. As applied to the considered problem of the UAV localization, the obtained solution ensures maximum difference of estimations of information volume in the ground scene under study and geo-referenced image. The author concluded that the optimal selection should be considered as such a desired functional dependence, which differs to the greatest extent from the calculated function characterizing the studied extreme localization mode.

Keywords: localization, UAV, integral information criterion, target functional, unconditional variational optimization.

References

- Ahrens S., Levine D., Andrews G., How J.P. Vision-based guidance and control of a hovering vehicle in unknown, GPS-denied. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'09), Kobe, Japan.* 2009, pp. 2643-2648. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152680
- Caballero F., Merino L., Ferruz J., Ollero A. Vision-based odometry and SLAM for medium and high altitude flying UAVs. *Unmanned Aircraft Systems: International Symposium On Unmanned Aerial Vehicles (UAV'08).* 2009, pp. 137-161. DOI 10.1007/978-1-4020-9137-7_9
- Artieda J., Sebastian J.M., Campoy P., Correa J.F., Mondragón I.F., Martínez C., Olivares M. Visual 3-D SLAM from UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2009, vol. 55, no. 4-5, pp. 299-321. DOI: 10.1007/s10846-008-9304-8
- Blösch M., Weiss S., Scaramuzza D., Siegwart R. Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'10).* 2010, pp. 21-28. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509920
- Kim J.H., Sukkarieh S. Airborne simultaneous localisation and map building. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), Taipei, Taiwan.* 2003. Vol. 1, pp. 406-411. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241629
- Kim N.V., Bodunkov N.E., Krylov I.G. *Vtoroi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta (BTS-II-2015)". Sbornik statei,* St. Petersburg, Politekhniko-servis, 2015, pp. 42-49.
- Buival A.K. *Vtoroi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta (BTS-II-2015)". Sbornik statei,* St. Petersburg, Politekhniko-servis, 2015, pp. 10-17.
- Afanas'ev I.M., Sagitov A.G., Danilov I.Yu., Magid E.A. *Vtoroi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta (BTS-II-2015)". Sbornik statei,* St. Petersburg, Politekhniko-servis, 2015, pp. 18-25.
- Bokovoi A.V. *Vtoroi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta (BTS-II-2015)". Sbornik statei,* St. Petersburg, Politekhniko-servis, 2015, pp. 26-33.
- Lemaire T., Berger C., Jung I., Lacroix S. Vision-Based SLAM: Stereo and Monocular Approaches //

- International Journal of Computer Vision*, 2007, vol. 74, no. 3, pp. 343-364. DOI: 10.1007/s11263-007-0042-3
11. Maksimov N.A., Skleimin Yu.B., Sharonov A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 30-39.
 12. Grumondz V.T., Polishchuk M.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 7-12.
 13. Conte G., Doherty P. An integrated UAV navigation system based on aerial image matching. *IEEE Aerospace Conference, 2008, Big Sky, MT, USA*, pp. 3142-3151. DOI: 10.1109/AERO.2008.4526556
 14. Saripalli S., Montgomery J.F., Sukhatme G.S. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Robotics and Automation Society*, 2003, vol. 19, no. 3, pp. 371-380. DOI: 10.1109/TRA.2003.810239
 15. Ganesan A., Gireesh Kumar R.N. Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 2250-2256. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.271
 16. Anitha G., Gireesh Kumar R.N. Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 2250-2256. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.271
 17. Sim D.-G., Park R.-H., Kim R.-Ch., Lee S. U., Kim I.-Ch. Integrated position estimation using aerial image sequences. *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 2002, vol. 24, no. 1, 18 p. DOI: 10.1109/34.982881
 18. Martínez C., Mondragón I.F., Campoy P., Sánchez-López J.L., Olivares-Méndez M.A. A hierarchical tracking strategy for vision-based applications on-board UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, vol. 72, no. 3-4, pp. 517-539. DOI: 10.1007/s10846-013-9814-x
 19. Dame A., Marchand E. Second-order optimization of mutual information for real-time image registration. *IEEE Image Processing*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 4190-4203. DOI: 10.1109/TIP.2012.2199124
 20. Viola P., Wells W. Alignment by maximization of mutual information. *International Journal of Computer Vision*, 1997, vol. 24, no. 2, pp. 137-154. DOI: 10.1109/ICCV.1995.466930