

УДК 004.932.7, 004.4, 004.021

## МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОДНОВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПО ВИДЕОПОТОКУ И ДАННЫМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАЛЫХ БПЛА

А.В. Боковой (*bokovoy@isa.ru*)

Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской академии наук, Москва

**Аннотация.** В статье рассматривается метод решения задачи одновременного картирования и локализации малого беспилотного летательного аппарата по данным, полученным с единственной камеры и датчиков инерциальной навигационной системы. Приведено экспериментальное исследование разработанного алгоритма и проведен анализ полученных результатов на актуальных коллекциях данных.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** SLAM, ИНС, методы одновременного картирования и локализации, видеопоток, единственная камера.

### Введение

В последнее время, для успешной навигации малых беспилотных летательных аппаратов активно применяются методы одновременного картирования и локализации (vision-based Simultaneous Localization and Mapping – vSLAM) по видеопотоку [Blösch M. et al, 2010][Fraundorfer F. et al, 2012][Yang S et al, 2016]. Подобный выбор обуславливается как ограниченным количеством датчиков, которые можно установить на малые беспилотные летательные аппараты, так и условиями, в которых происходит навигация (например, в помещениях датчики GPS/ГЛОНАСС не работают). С развитием электроники стало возможным производить нетрудоёмкие вычисления на борту малых БПЛА, но этого по-прежнему недостаточно для полноценной обработки алгоритмов компьютерного зрения, к которым относятся методы vSLAM, в реальном времени. Тем не менее, мощности современных бортовых вычислителей вполне хватает для сжатия видеопотока, полученного с единственной камеры, установленной

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-07483)

на БПЛА, с последующей передачей его на рабочую станцию по беспроводному каналу и дальнейшей обработкой алгоритмами vSLAM.

Для повышения степени автономности малых БПЛА необходимо увеличить один из ключевых параметров алгоритмов vSLAM, а именно – быстродействие, при сохранении точности построения пройденной траектории с картой и локализации. Также, используя методы одновременного картирования и локализации по видеопотоку, следует учитывать накапливающиеся по мере работы алгоритма ошибки, которые возникают в силу использования вероятностных моделей на этапах обработки видеопотока, при составлении карты и локализации, а также из-за не совершенности камер (часто присутствуют помехи, искажения и т.д.). Для коррекции таких ошибок существует семейство алгоритмов, называемых алгоритмами замыкания траекторий (loop-closure algorithms)[Angeli A. et al, 2008][Whelan T. et al, 2013]. Такие алгоритмы позволяют скорректировать построенную карту и пройденную траекторию при условии того, что робототехническое устройство (в конкретном случае – малый беспилотный летательный аппарат) проходит через уже известное место (т.е. место, для которого уже построена локальная карта и траектория), а также успешно его распознает.

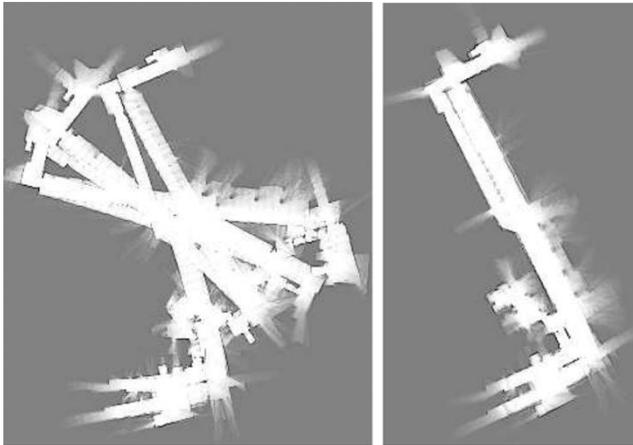


Рис. 1. Пример результата работы алгоритма loop-closure для задачи SLAM

Основным недостатком алгоритмов loop-closure является их недостаточное для функционирования в реальном времени быстродействие. Наиболее затратной частью алгоритма является перестроения карты и нахождение уже пройденных мест. Один из выходов из сложившейся ситуации – запуск алгоритмов vSLAM и loop-closure параллельно при понижении частоты loop-closure до 1-2 Гц. Даже при

предложенном подходе, современные бортовые вычислители для малых БПЛА не способны обрабатывать всю информацию в реальном времени.

Одним из выходов из сложившейся ситуации является дополнение информации с камеры малого беспилотного летательного аппарата данными с инерциальной навигационной системы (ИНС) и полное или частичное исключение алгоритма loop-closure из метода vSLAM. В выбранном для дальнейших исследований [Боковой А.В, 2015] методе LSD-SLAM [Engel J. et al, 2014] на этапе составления карты и реконструкции пройденной траектории используется расширенный фильтр Калмана (extended Kalman filter – EKF)[Ljung L, 1979], где управляющий вектор заранее не известен и вычисляется посредством алгоритмов компьютерного зрения. При использовании данных с ИНС отпадает надобность в вычислении управляющего вектора, т.к. его параметры можно получить из данных акселерометра (после устранения шумов)[El-Sheimy et al, 2004] при меньших вычислительных затратах. Еще одним подходом может быть корректировка управляющего вектора, рассчитанного методом vSLAM, с помощью данных ИНС, т.е. вычисление управляющего вектора на каждой итерации алгоритма происходит параллельно как для видеопотока, так и для ИНС. Такой подход позволит увеличить точность построения пройденной траектории и карты окружающей среды, но увеличит время работы алгоритма, что может сделать применение такого алгоритма на бортовых вычислителях малых беспилотных летательных аппаратов – невозможной.

Также, отрицательной особенностью работы многих алгоритмов vSLAM является затруднение локализации и построения карты при потере связи текущего кадра с предыдущими [Williams B. et al, 2007], поскольку процесс работы полностью завязан на сравнении текущего кадра с уже имеющимися. При потере связи между кадрами, требуются дополнительные алгоритмы для восстановления позиции робототехнической системы, ее релокации и перестроения карты. Поставленную проблему также можно решить с помощью данных, полученных с ИНС, поскольку нам всегда будет известна ориентация камеры (данные с гироскопа) относительно предыдущего положения.

## 1. Краткое описание метода

Основная идея для разработанного метода одновременного картирования и локализации по данным видеокамеры и инерциальной навигационной системы состоит в замене или дополнении расчетов расширенного фильтра Калмана на этапах предсказания и коррекции данными с датчиков ИНС. Для этого, на этапе локализации и составления карты, в алгоритм LSD-SLAM были добавлены следующие сценарии:

- 1) Частичная замена управляющего вектора данными, рассчитанными с помощью датчиков инерциальной навигационной системы, при потере связи алгоритма с предыдущей точкой наблюдения.
- 2) Усреднение управляющих векторов, полученных с помощью камеры и с помощью ИНС.
- 3) Полная замена управляющего вектора данными, рассчитанными с помощью датчиков инерциальной навигационной системы, на всех этапах работы алгоритма.

Метод расчета управляющего вектора для расширенного фильтра Калмана подробно описан в работе [Nützi G. et al, 2011]. Для реализации метода IMU+LSD-SLAM, предложенный метод был доработан с учетом возможности его практической реализации и работы с моделируемыми данными.

## **2. Реализация алгоритма**

Алгоритм был реализован под операционную систему Linux на языке C++. В качестве рабочей среды был использован популярный для решения робототехнических задач фреймворк Robot Operating System (ROS). В качестве основы была взята открытая реализация метода LSD-SLAM [[https://github.com/tum-vision/lst\\_slam](https://github.com/tum-vision/lst_slam)].

## **3. Экспериментальное исследование**

Эксперимент проводился в среде Gazebo с использованием фреймворка ROS. В качестве модели среды для проведения испытаний была выбрана модель помещения, созданная для проведения конкурса RoboCup Rescue Simulation League 2013, которая была адаптирована для Gazebo.

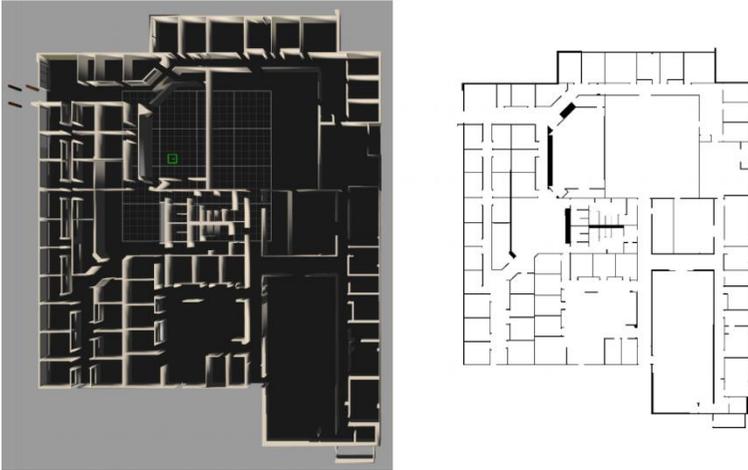


Рис. 2. Модель среды, использованная для экспериментального исследования метода. Слева – вид модели сверху. Справа – план модели помещения

Помещение состоит из набора комнат и коридоров разной площади. Для упрощения работы с моделью, мебель и дополнительные препятствия отсутствуют. Общая площадь – 6 300 м<sup>2</sup> (задана вручную).

В качестве робототехнического устройства, которое будет производить картирование и локализацию в представленной среде, был выбран стандартный малый беспилотный летательный аппарат hector\_quadrotor.

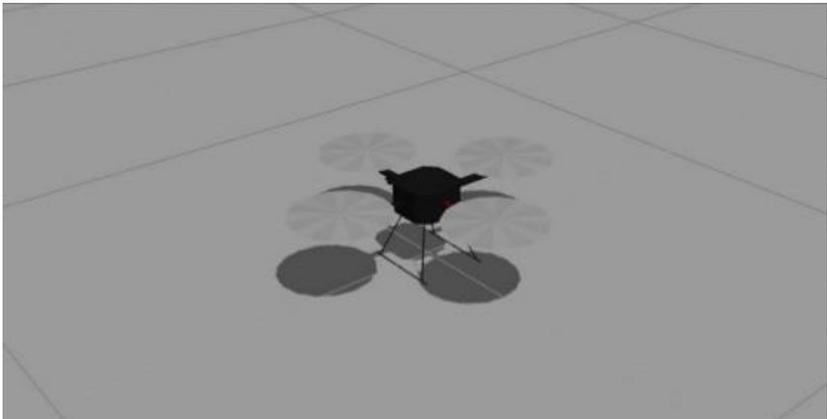


Рис. 3. Модель малого беспилотного летательного аппарата hector\_quadrotor в среде Gazebo

На hector\_quadrotor была смоделирована работа следующих датчиков:

- 3-х осевой гироскоп;
- 3-х осевой акселерометр;
- магнетометр;
- монокулярная камера с заданной матрицей внутренней калибровки.

Частота обновления данных для инерциальной навигационной системы составляет 200 Гц, для монокулярной камеры – 30 Гц. Разрешение изображений, полученных с камеры составляет 640x480 пикселей. Динамическая модель робота задается стандартными значениями, используемыми для hector\_quadrotor [Meyer J. et al, 2012].

В качестве сценариев для тестирования метода были составлены 10 траекторий на выбранной модели местности. Длина траекторий варьируется от 25 м до 183 м. На выборках присутствуют как траектории с замыканиями (7 шт.), так и без (3 шт.). Предполагается, что беспилотный летательный аппарат движется по заданным траекториям равномерно со скоростью 1 м/с, а угловая скорость рысканья не превышает 0,5 об/с. Данные для датчиков ИНС и камеры были составлены при “ручном” полете по каждой из траекторий при заданных частотах обновлений датчиков. Зашумленность данных моделируется за счет динамической системы модели малого беспилотного летательного аппарата, которая учитывает естественные колебания при полете.

Результат работы разработанного метода сравнивается (IMU+LSD-SLAM) с методом LSD-SLAM. Основными параметрами для сравнения являются:

- скорость работы алгоритма;
- точность построенной траектории;
- точность построенной карты.

В качестве параметра для измерения точности построенной траектории было выбрано среднее отклонение от эталонной (ground-truth) траектории. Эта величина является средним разности расстояния между построенной методом в каждый момент времени траектории и реально пройденной беспилотным летательным аппаратом траектории в метрах.

Для тестирования была выбрана реализация, в которой данные ИНС полностью заменяют расчет управляющего вектора в расширенном фильтре Калмана. В таблице 6.1 представлены результаты экспериментального исследования.

Для большей наглядности можно представить полученные данные в виде графиков.

Результаты тестирования разработанного метода и LSD-SLAM

Сценарий	Длина (м)	Замыкания	Среднее время обработки кадра (сек)		Среднее отклонение от эталонной траектории (м)		Среднее отклонение от эталонной карты (м)	
			LSD-SLAM	IMU+LSD-SLAM	LSD-SLAM	IMU+LSD-SLAM	LSD-SLAM	IMU+LSD-SLAM
<b>traj_1</b>	25,3	-	0,189	0,137	0,23	0,24	0,35	0,34
<b>traj_2</b>	28,9	+	0,211	0,141	0,18	0,13	0,52	0,5
<b>traj_3</b>	39,2	+	0,231	0,156	0,33	0,34	0,57	0,51
<b>traj_4</b>	58,3	+	0,288	0,135	0,38	0,34	0,56	0,53
<b>traj_5</b>	59,2	+	0,29	0,143	0,41	0,37	0,62	0,57
<b>traj_6</b>	91,5	-	0,192	0,149	0,81	0,6	0,93	0,71
<b>traj_7</b>	97,2	+	0,291	0,147	0,69	0,63	0,85	0,77
<b>traj_8</b>	101	+	0,295	0,143	0,71	0,65	0,86	0,78
<b>traj_9</b>	110,2	-	0,185	0,159	0,73	0,66	1,12	0,89
<b>traj_10</b>	125,3	+	0,315	0,141	0,78	0,69	0,98	0,91

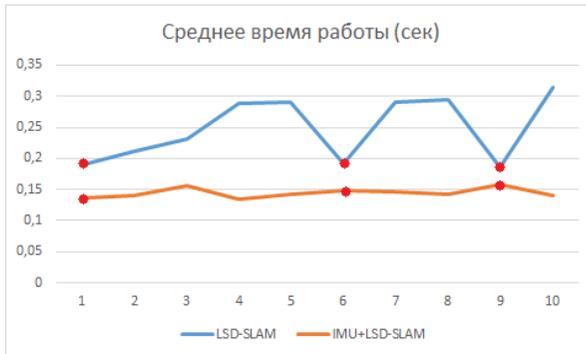


Рис. 4. Среднее время работы LSD-SLAM и IMU+LSD-SLAM. Ось X – номер сценария, ось Y – время работы в сек. Красным выделены скорости работы на незамкнутых траекториях

Как видно из полученного графика, время работы алгоритма IMU+SLAM стабильно увеличивается с каждой коллекцией. Такое поведение связано с тем, что длина траектории увеличивается от коллекции к коллекции и время, необходимое на обработку накопленных данных также увеличивается. В то время как время работы алгоритма LSD-SLAM сильно зависит от наличия замыкания траектории, поскольку в таком случае к работе алгоритма подключается метод замыкания траекторий (loop-closure algorithm), который корректирует построенную карту и пройденную траекторию, при этом затрачивая на корректировку ощутимое

количество времени. В сценариях без замыканий (сценарии traj\_1, traj\_6, экфо\_9), скорость работы LSD-SLAM заметно выше, чем с замыканиями.

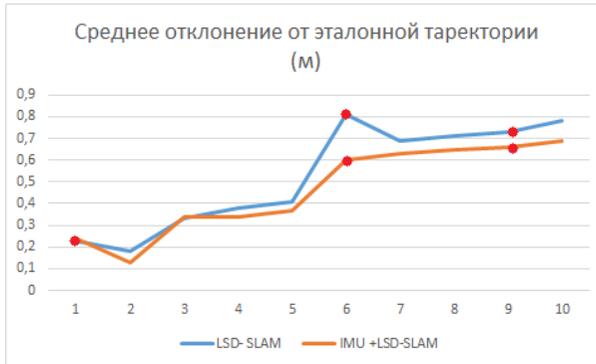


Рис. 5. Среднее отклонение траекторий, построенных алгоритмами LSD-SLAM и IMU+LSD-SLAM от эталонных. Красным выделены отклонения на незамкнутых траекториях

Среднее отклонение полученной траектории от эталонной для обоих методов равномерно возрастает в зависимости от длины пройденной траектории. Существенная разница видна лишь на коллекции traj\_6. Резкое повышение отклонения в случае с traj\_6 для метода LSD-SLAM можно объяснить тем, что в сценарии присутствуют резкие повороты и алгоритм корректировки траектории тратит много времени на восстановление пути и карты.

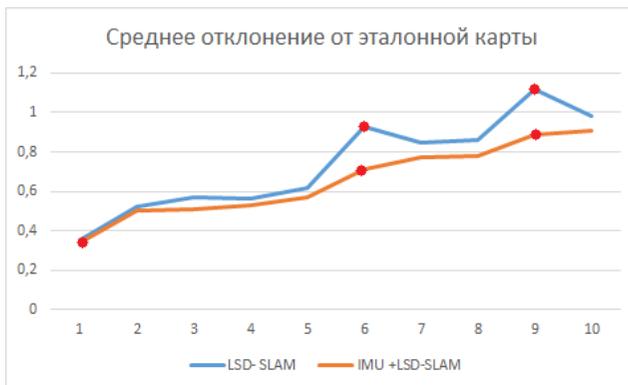


Рис. 6. Среднее отклонение построенной карты от эталонной для методов LSD-SLAM и IMU+LSD-SLAM. Красным выделены отклонения на незамкнутых траекториях

Среднее отклонение построенной методами LSD-SLAM и IMU-SLAM карты от эталонной также возрастает в зависимости от длины траектории. Скачки в сторону увеличения отклонения для метода LSD-SLAM наблюдаются на сценариях без замыканий траектории, поскольку корректировки карты в таком случае не происходит и погрешность вычислений продолжает накапливаться. Метод IMU+LSD-SLAM в таких условиях работает более стабильно.

## Заключение

В результате работы был разработан метод, основанный на алгоритме LSD-SLAM, учитывающий информацию, полученную с датчиков инерциальной навигационной системы малого беспилотного летательного аппарата. Работоспособность алгоритма была протестирована на специально разработанных модельных данных. Экспериментальное исследование показало, что предложенный метод позволил получить прирост производительности в среднем на 30% (44,5% в лучшем случае) по сравнению с LSD-SLAM, при этом повысив точность построения траектории на 10% и карты на 7%. Таким образом, можно заключить, что предложенный метод может быть успешно использован в задачах навигации малых беспилотных летательных аппаратов, оснащенных единственной камерой и датчиками инерциальной навигационной системы, в том числе с возможностью производить вычисления на борту, что позволит повысить степень автономности таких робототехнических устройств.

## Список литературы

- [Blösch M. et al. 2010] Blösch, M., Weiss, S., Scaramuzza, D., & Siegwart, R. Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments //Robotics and automation (ICRA), 2010 IEEE international conference on. – IEEE, 2010. – С. 21-28
- [Fraundorfer F. et al., 2012] Fraundorfer, F., Heng, L., Honegger, D., Lee, G. H., Meier, L., Tanskanen, P., & Pollefeys, M. Vision-based autonomous mapping and exploration using a quadrotor MAV //2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2012. – С. 4557-4564.
- [Yang S. et al, 2016] Yang S., Scherer S. A., Zell A. Robust Onboard Visual SLAM for Autonomous MAVs //Intelligent Autonomous Systems 13. – Springer International Publishing, 2016. – С. 361-373

- [**Angeli A. et al, 2008**] Angeli, A., Filliat, D., Doncieux, S., & Meyer, J. A. Fast and incremental method for loop-closure detection using bags of visual words //IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – Т. 24. – №. 5. – С. 1027-1037
- [**Whelan T. et al, 2013**] Whelan, T., Kaess, M., Leonard, J. J., & McDonald, J. Deformation-based loop closure for large scale dense RGB-D SLAM // Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. – IEEE, 2013. – С. 548-555.
- [**Боковой А.В, 2015**] 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, 9 октября 2015г., г. Санкт-Петербург, Россия): Труды семинара. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015. С. 26-33.]
- [**Engel J, et al, 2014**] Engel J., Schöps T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM //European Conference on Computer Vision. – Springer International Publishing, 2014. – С. 834-849.]
- [**Ljung L, 1979**] Ljung L. Asymptotic behavior of the extended Kalman filter as a parameter estimator for linear systems //IEEE Transactions on Automatic Control. – 1979. – Т. 24. – №. 1. – С. 36-50.
- [**El-Sheimy et al, 2004**] El-Sheimy N., Nassar S., Noureldin A. Wavelet de-noising for IMU alignment //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2004. – Т. 19. – №. 10. – С. 32-39.
- [**Williams B., et al, 2007**] Williams B., Klein G., Reid I. Real-time SLAM relocation //2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision. – IEEE, 2007. – С. 1-8
- [**Nützi G. et al, 2011**] Nützi, G., Weiss, S., Scaramuzza, D., & Siegwart, R. Fusion of IMU and vision for absolute scale estimation in monocular SLAM //Journal of intelligent & robotic systems. – 2011. – Т. 61. – №. 1-4. – С. 287-299.
- [**Meyer J. et al. 2012**] Meyer, J., Sendobry, A., Kohlbrecher, S., Klingauf, U., & Von Stryk, O. Comprehensive simulation of quadrotor uavs using ros and gazebo //International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. – С. 400-411.