

СОВРЕМЕННЫЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.05

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-2-81-92

**ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ  
РОБОТОВ OMNI-DIRECTIONAL VSLAM\***

В.Г. АЛТУХОВ

*630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматки. E-mail: altukhov@ngs.ru*

Технология SLAM (от англ. Simultaneous Localization And Mapping – одновременное построение карты и определение местоположения) на сегодняшний день является передовой в вопросе навигации мобильных роботов [1]. Она необходима для успешного перемещения робота по различного типа местности и заключается в построении карты окружающей среды и отслеживании его (робота) местоположения в этой среде, что осуществляется его бортовым компьютером. Как правило, информацию об окружающей среде бортовая система робота получает посредством датчиков, таких как лазерные и ультразвуковые дальномеры, одна, две или три видеокамеры. Ультразвуковые и лазерные датчики являются весьма дорогостоящими и, что самое главное, массивными устройствами, а использование ограниченного количества видеокамер хотя и дает намного больше информации (цвет, освещенность и т. д.), но обеспечивает далеко не полный обзор окружающего робот пространства. В связи с этим автор статьи ознакомился с публикациями, связанными с вопросами получения мобильным роботом информации об окружающей среде с большим полем обзора. Было обнаружено, что существует так называемая технология Omni-directional SLAM (от англ. Omni-directional – многонаправленный), которая для получения информации об окружающей среде использует следующие датчики: катадиоптрическая камера, массив из камер или камера со сверхширокоугольным объективом. В данном обзоре представляется информация о таких устройствах и разработках алгоритмов SLAM, работающих на их основе.

**Ключевые слова:** навигация мобильных роботов, SLAM, vSLAM, построение карты, определение местоположения, многонаправленные камеры, катадиоптрические камеры, “lady-bug” камеры, камеры со сверхширокоугольным объективом

---

\* Статья получена 24 января 2018 г.

## ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий проблема автономного функционирования мобильных роботов широко обсуждается в различных областях науки. Помимо робототехники, это и область обработки изображений, и машинное обучение, и многое другое. Большинство таких областей задействовано в вопросах навигации, которая является неотъемлемой частью автономных роботов. На сегодняшний день самая передовая технология, реализующая навигацию роботов, – это SLAM. В свою очередь, самые перспективные алгоритмы SLAM – те, которые основываются на использовании камер, так называемые алгоритмы *visual SLAM* (*vSLAM*). Это связано с тем, что, в отличие от алгоритмов, основанных на использовании лазерных или ультразвуковых датчиков в качестве основных источников информации об окружающей среде, алгоритмы *vSLAM* могут с помощью камер получать более детальную информацию об объектах окружающей среды, об их цвете. Кроме того, камеры – более легкие устройства, что позволяет использовать *vSLAM* на мобильных роботах с ограниченной грузоподъемностью. Вместе с тем визуальную информацию намного сложнее обрабатывать, и ввиду этого многие проблемы *vSLAM* еще далеки от своих оптимальных решений.

Обычно *vSLAM*, действующий в качестве системы навигации мобильного робота, анализирует изображения окружающей среды, полученные посредством одной, двух или трех видеокамер. Использование такого количества датчиков создает ограничение поля обзора мобильного робота, что делает его уязвимым как при построении карты, где ввиду резких поворотов при появлении преград или в плохоструктурированной местности алгоритм может потерять ориентиры, используемые при ее построении, так и при идентификации динамических объектов, которые могут внезапно преградить роботу путь или в худшем случае стать причиной его поломки. В связи с этим автор изучил работы по исследованию так называемых многонаправленных датчиков и основанных на них алгоритмов *vSLAM*. Многонаправленные датчики (в случае *vSLAM*) – это основанные на камерах датчики, способные получать большую визуальную информацию об окружающей среде за счет значительно большего угла обзора – от примерно 150 градусов до полного обзора вокруг своей оси и полного «сферического» обзора. Такой тип сенсоров позволяет снизить влияние вышеперечисленных проблем, но, в свою очередь, усложняет алгоритмы *vSLAM* ввиду своих особенностей.

В разделе 1 дано краткое описание основных многонаправленных датчиков; в разделе 2 рассказано о существующих алгоритмах *vSLAM*, базирующихся на таких датчиках; в разделе 3 описана методологическая база, которая применяется в исследованиях алгоритмов многонаправленного *SLAM*.

## 1. МНОГОНАПРАВЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ

На сегодняшний день существует три основных типа многонаправленных датчиков: катадиоптрические датчики, камеры со сверхширокоугольным объективом и массивы камер с пересечением области видимости и без ее пересечения. Далее последует описание каждой из этих разновидностей.

### 1.1. Катадиоптрические сенсоры

Катадиоптрическая камера представляет собой установку, состоящую из обычной видеокамеры и изогнутого зеркала (в форме полусферы, конуса и т. п.), расположенного напротив (рис. 1).

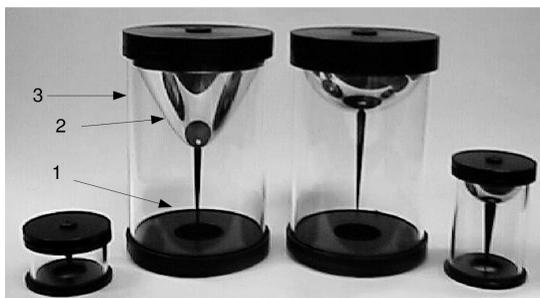


Рис. 1. Внешний вид катадиоптрического сенсора:

1 – отверстие для видеокамеры, 2 – изогнутое зеркало,  
3 – стеклянный корпус



Рис. 2. Изображение на выходе катадиоптрической камеры

На рис. 2 изображен кадр, полученный на выходе катадиоптрической камеры, из которого можно понять, что робот с помощью нее может наблюдать за окружающей средой на 360 градусов вокруг своей вертикальной оси. При этом картинка достаточно искажена, а в центре находится ненаблюдаемый участок – отражение камеры в зеркале.

## 1.2. Массив камер

Массив камер, или lady-bug камера (от англ. *lady-bug* – «божья коровка»), представляет собой набор направленных в разные стороны камер с пересекающимся (стерео) или непересекающимся полем обзора, которые могут предоставить роботу наиболее полный обзор окружающей среды (рис. 3).



Рис. 3. Примеры внешнего вида камеры «божья коровка»

Изображение, захваченное с подобного девайса, показано на рис. 4. Данное изображение получено с датчика с малым количеством камер (рис. 3, камеры слева) и без пересечения полей зрения. Также мы можем заметить, что картинка весьма искажена – это опять же зависит от количества камер и параметров их оптической системы.



Рис. 4. Выходное изображения камеры «божья коровка»

Вышеперечисленные типы многонаправленных датчиков, кроме прочего, были исследованы в работе [2].

### 1.3. Камера со сверхширокоугольным объективом

Другое название такого типа сенсора – камера «рыбий глаз» (от англ. *fishyecamera*) – это обычная камера с широкоугольными линзами в оптическом тракте (рис. 5).



Рис. 5. Примеры внешнего вида камеры «рыбий глаз»

Изображение, полученное посредством камеры *fisheye*, показано на рис. 6. На нем мы можем наблюдать средний уровень искажения и наименьший угол обзора в сравнении с остальными сенсорами. Угол обзора в таких камерах может достигать порядка 220 градусов, причем с его увеличением будет расти и искажение.

Геометрические модели всех вышеперечисленных разновидностей сенсоров кратко рассматриваются в работе [3].

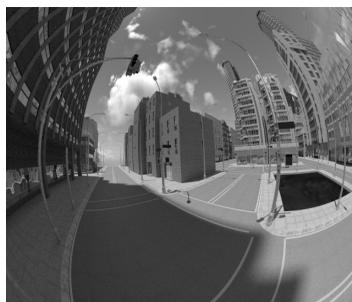


Рис. 6. Выходное изображение камеры «рыбий глаз»

## 2. АЛГОРИТМЫ МНОГОНАПРАВЛЕННОГО SLAM

По сути алгоритмы многонаправленного *vSLAM* являются обычными *vSLAM* (ORB-SLAM, LSD-SLAM и др.), адаптированными под использование многонаправленных датчиков. По большей части их адаптация заключается в замене модели камеры для корректного представления точек окружающей среды на карте, строящейся алгоритмом *vSLAM*.

В статье [4] авторы описывают то, как они интегрировали модель сферической камеры (МСК) для катадиоптрической системы в алгоритм vSLAM. МСК – это проекционная модель, которая объединяет катадиоптрическую систему и обычную видеокамеру. Авторы внедрили данную систему в vSLAM, основанную на расширенном фильтре Калмана (РФК); провели эксперимент, сравнив многонаправленную систему с алгоритмом, использующим стандартную перспективную камеру. В результате эксперимента выяснилось, что использование многонаправленной камеры дает намного лучшую точность оценки траектории видеокамеры.

В публикации [5] авторы также использовали сферическую модель камеры в алгоритме vSLAM, основанном на РФК, но с камерой типа «божья коровка». Был проведен эксперимент, который доказал эффективность такого подхода при использовании его на неизвестной местности.

Исследователи, авторы статьи [3], предложили реализацию монокулярного SLAM (алгоритм, использующий одну видеокамеру для построения карты и локализации робота) для массива камер и камеры типа «рыбий глаз». Алгоритмы отслеживания местоположения и построения карты были адаптированы под общую многонаправленную модель, которая позволяет работать с камерами, угол обзора которых превышает 150 градусов. Такой подход, в сравнении с ранее предложенными обычными методами, позволил не только получать сравнительно большую часть информации об окружающей среде, но и сделать систему навигации более надежной в случае с вырожденным (в частности, с вращательным) движением. На рис. 7 показан результат работы алгоритма при построении карты окружающей среды.

Авторы статьи [6] с помощью 3D-моделирования сгенерировали набор изображений, которые соответствуют захваченным кадрам с обычной (перспективной) камеры, камеры типа «рыбий глаз» и катадиоптрического датчика. Данные наборы кадров представляют собой изображения, полученные как внутри помещения, так и в городской среде. Модели камер, используемых при генерировании данных изображений, были внедрены в систему навигации визуальной одометрии (от англ. *Visual Odometry*). После этого был проведен опыт, сравнивающий эффективность различных типов датчиков при использовании их как внутри помещения, так и снаружи. В результате эксперимента выяснилось, что катадиоптрические сенсоры при одинаковом разрешении захваченного кадра эффективнее для использования внутри помещения, тогда как перспективные камеры лучше подходят для городской среды.

Авторы [6] также предоставили общий доступ к этим сгенерированным наборам изображений (датасетам), о целесообразности использования которых будет рассказано в разделе 3.

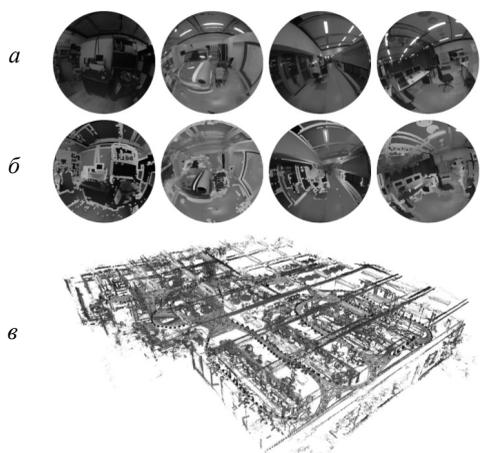


Рис. 7. Этапы реконструкции карты местности:

*а* – изображения, захваченные с помощью камеры «рыбий глаз»; *б* – выделение особенностей на полученных изображениях; *в* – соединение выделенных особенностей, результатом чего является построенная карта местности

Исследования в области алгоритмов vSLAM, основанных на многонаправленных датчиках, проводились также в работах [7–11].

### 3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения исследования, результатом которого будет являться эксперимент над разработанной системой визуальной навигации, использующей в качестве органа зрения один из многонаправленных датчиков, необходимо предпринять следующие шаги:

а) осуществить обоснованный выбор исследуемых алгоритма навигации и датчика;

б) реализовать данную систему навигации;

в) исследовать ее экспериментально.

Далее вкратце будет описан каждый шаг.

Выбор алгоритма навигации и датчика должен производиться на основании опыта предыдущих исследований. Так, изучив публикации по современным алгоритмам, можно сделать предположения об их плюсах и минусах в связке с многонаправленными датчиками (связанные с ними работы также необходимо

изучить). В первую очередь следует обособленно изучить работы по алгоритмам и датчикам, которые ранее не исследовались вместе, ввиду того что это может сформировать такой пункт исследования, как научная новизна. При этом не стоит забывать о том, что такая комбинация алгоритма и датчика может дать результаты, которые будут хуже уже существующих. Это, конечно, тоже будет являться результатом, но не обоснованным ничем, кроме новизны.

Так как на сегодняшний день алгоритмы навигации в своем большинстве разработаны для стереокамерных или монокулярных датчиков, в основе которых лежат обычные цифровые камеры, реализация системы навигации заключается в адаптации выбранного алгоритма визуальной навигации для использования с многонаправленным датчиком, будь то катадиоптрическая камера, массив из камер или камера с широкоугольной линзой. Адаптация заключается в изменении, в алгоритме, математической модели используемого датчика и оптимизации других функций для работы с ним.

Весьма проблематично, даже в наши дни, иметь в своем распоряжении многонаправленные камеры. Для того чтобы это не становилось причиной «проста» исследования, исследователи, которые обладают подобными сенсорами, выкладывают в общее пользование так называемые «датасеты» – последовательность изображений, сделанную каким-либо датчиком. Датасеты полезны не только для восполнения пробела, связанного с отсутствием нужного датчика, но и для сравнения результатов экспериментов различных исследователей. Экспериментальные исследования двух разных алгоритмов, производящиеся на базе одного датасета, дают данные для более детального сравнительного анализа. Например, в случае с многонаправленными датчиками (а именно катадиоптрическим сенсором и камерой с широкоугольной линзой) имеется общедоступный датасет, исследованный в статье [6], который может быть использован при выполнении экспериментальной части исследования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной статье проведен краткий обзор технологии многонаправленного vSLAM. В частности, рассмотрены типы датчиков, применяемых в рамках данной технологии для получения информации об окружающей среде, и описаны уже реализованные алгоритмы vSLAM, основанные на датчиках такого типа. Также для прояснения вопроса проведения исследований таких систем рассказывается о методологической базе. В целом на основании изученной литературы можно считать, что навигация мобильных роботов посредством технологии Omni-directional vSLAM является весьма перспективной темой исследований.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. RoboCraft (технология SLAM) [Электронный ресурс]. – URL: <http://robocraft.ru/blog/technology/724.html> (дата обращения: 22.06.2018).
2. Omnidirectional sensors for mobile robots / S. Blumenthal, D. Droschel, D. Holz, T. Linder, P. Molitor, H. Surmann // Workshop Proceedings of SIMPAR 2008, Venice, Italy, November, 3–7, 2008. – Venice, 2008. – P. 414–425.
3. *Caruso D., Engel J., Cremers D.* Large-scale direct slam for omnidirectional cameras // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 28 – October 2, 2015, Hamburg, Germany. – Hamburg, 2015. – P. 141–148.
4. *Rituerto A., Puig L., Guerrero J.* Visual SLAM with an omnidirectional camera // 2010 20<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition CPR 2010, 23–26 August 2010, Istanbul, Turkey: Proceedings. – Istanbul, 2010. – P. 348–351.
5. An omni-directional vSLAM based on spherical camera model and 3D modeling / Guofeng Tong, Zizhang Wu, NingLong Weng, Wenbo Hou // Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. – Beijing, China, 2012. – P. 4551–4556.
6. Benefit of large field-of-view cameras for visual odometry / Z. Zhang, H. Rebecq, C. Forster, D. Scaramuzza // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Stockholm, Sweden, 2016. – P. 801–808.
7. *Kaess M., Dellaert F.* Probabilistic structure matching for visual SLAM with a multi-camera rig // Computer Vision and Image Understanding. – 2010. – Vol. 114. – P. 286–296.
8. *Carrera G., Angeli A., Davison A.J.* SLAM-based automatic extrinsic calibration of a multi-camera rig // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – Shanghai, China, 2011. – P. 2652–2659.
9. *Davison A., González Y., Kita N.* Real-time 3D SLAM with wide-angle vision // IFAC Proceedings Volumes. – 2004. – Vol. 37 (8). – P. 868–873.
10. *Scaramuzza D., Siegwart R.* Appearance guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles // IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – Vol. 24 (5). – P. 1015–1026.
11. *Kim J., Chung M.* SLAM with Omni-directional stereo vision sensor // Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – Las Vegas, NV, 2003. – Vol. 1. – P. 442–447.

*Алтухов Виктор Григорьевич*, аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы автоматического управления, робототехника. E-mail: altukhov@ngs.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-2-81-92

## **A survey of mobile robot's navigation technology Omni-directional vSLAM\***

**V.G. Altukhov**

*Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department Automatics. E-mail: altukhov@ngs.ru*

Today "Simultaneous Localization and Mapping" technology is most advanced in the issue of mobile robots navigation [1]. It is necessary to successfully moving the robot at a different type of location and is to building an environmental map and tracking its (robot) location in this environment, which is carried out by its on-board computer. Typically, the robot's on-board system receives information about the environment through sensors such as laser and ultrasonic rangefinders, one, two or three cameras. Ultrasonic and laser sensors are very expensive and massive devices, and the use of a limited number of video cameras, although they give much more information (color, illumination, etc.), but provide a quite short view of the robot's surrounding space. In this regard, the author of the article decided to get acquainted with publications related to the issues of obtaining mobile information about the environment with a large field of view. It was discovered that there is a so-called "Omni-directional SLAM" technology, which uses the following sensors to obtain information about the environment: a catadioptric cameras, an arrays of cameras or a cameras with a wide-angle lens. In this review, information on such devices and development of SLAM algorithms working on their basis is presented.

**Keywords:** navigation of mobile robots, SLAM, vSLAM, mapping, localization, omni-directional cameras, catadioptric cameras, "lady-bug" cameras, fisheye cameras

---

\* Received 24 January 2018.

## REFERENCES

1. *RoboCraft (tekhnologiya SLAM)* [Robocraft (SLAM technology)]. Available at: <http://robocraft.ru/blog/technology/724.html> (accessed 22.06.2018).
2. Blumenthal S., Droeschel D., Holz D., Linder T., Molitor P., Surmann H. Omnidirectional sensors for mobile robots. *Workshop Proceedings of SIMPAR 2008*, Venice, Italy, November, 3–7, 2008, pp. 414–425.
3. Caruso D., Engel J., Cremers D. Large-scale direct slam for omnidirectional cameras. *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, September 28 – October 2, 2015, Hamburg, Germany, pp. 141–148.
4. Rituerto A., Puig L., Guerrero J. Visual SLAM with an omnidirectional camera. *2010 20<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition CPR 2010*, 23–26 August 2010, Istanbul, Turkey: proceedings, pp. 348–351.
5. Guofeng Tong, Zizhang Wu, NingLong Weng, Wenbo Hou. An Omni-directional vSLAM based on spherical camera model and 3D modeling. *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Beijing, China, 2012, pp. 4551–4556.
6. Zhang Z., Rebecq H., Forster C., Scaramuzza D. Benefit of large field-of-view cameras for visual odometry. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016, pp. 801–808.
7. Kaess M., Dellaert F. Probabilistic structure matching for visual SLAM with a multi-camera rig. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, vol. 114, pp. 286–296.
8. Carrera G., Angeli A., Davison A.J. SLAM-based automatic extrinsic calibration of a multi-camera rig. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011, pp. 2652–2659.
9. Davison A., González Y., Kita N. Real-time 3D SLAM with wide-angle vision. *IFAC Proceedings Volumes*, 2004, vol. 37 (8), pp. 868–873.
10. Scaramuzza D., Siegwart R. Appearance guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, vol. 24 (5), pp. 1015–1026.
11. Kim J., Chung M. SLAM with omni-directional stereo vision sensor. *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV, 2003, vol. 1, pp. 442–447.

Для цитирования:

Алтухов В.Г. Обзор технологии навигации мобильных роботов Omni-directional vSLAM // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 2 (92). – С. 81–92. – doi: 10.17212/2307-6879-2018-2-81-92.

For citation:

Altukhov V.G. Obzor tekhnologii navigatsii mobil'nykh robotov Omni-directional vSLAM [A survey of mobile robot's navigation technology Omni-directional vSLAM]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (93), pp. 81–92. doi: 10.17212/2307-6879-2018-2-81-92.