

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.93; 004.896

### СИСТЕМА ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ НА ОСНОВЕ ПОДХОДА CoreSLAM

Д. А. Барамя<sup>1,2</sup>, М. С. Дьяков<sup>2</sup>, С. А. Кузиковский<sup>2,3</sup>,  
М. М. Лаврентьев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>2</sup>ООО «СофтЛаб-НСК»,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>3</sup>Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: bard@sl.iae.nsk.su

Предложен новый метод замыкания циклов, основанный на хранении локальных карт препятствий, для сокращения накопленной ошибки локализации. Преимущество нового метода в сравнении с ранее предложенным заключается в уменьшении расхода оперативной памяти. Представлены результаты тестирования разработанной системы и сравнения с аналогами.

*Ключевые слова:* одновременная локализация и построение карты, SLAM, замыкание циклов, фильтр частиц, предсказание позиции, итеративный алгоритм ближайших точек, ИСР.

DOI: 10.15372/AUT20170609

**Введение.** Одновременная локализация и построение карты SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) — метод, применяемый при создании автономных мобильных роботов для вычисления текущей позиции робота и построения карты окружающей местности. В последние годы метод SLAM стал фундаментальной областью исследований в робототехнике, поскольку решение данной задачи позволяет использовать роботов в неизвестном окружении без вмешательства человека. В настоящее время существует большое количество SLAM-подходов. Один из наиболее простых в реализации и в то же время удобный для модификации и интеграции в другие системы, с хорошей производительностью и возможностью работать с динамическим окружением — это метод CoreSLAM [1]. В [2] были рассмотрены недостатки такого метода и предложены подходы для их устранения:

- 1) метод локализации по визуальным маркерам, уменьшающий погрешность оценки позиции управляемого объекта на однородной местности;
- 2) алгоритм начального предсказания позиции объекта при отсутствии внешнего устройства для получения одометрии, что позволяет сократить список необходимого оборудования для работы SLAM-системы;
- 3) алгоритм замыкания циклов (loop closing), который распознаёт ранее исследованные области для уменьшения накопленной ошибки локализации со временем.

Существенным недостатком указанных методов является большой расход памяти для хранения карт препятствий при работе алгоритма замыкания циклов. С использованием этих подходов создана новая система одновременной локализации и построения карты на основе системы CoreSLAM. В данной работе предлагается другой алгоритм замыкания циклов, основанный на хранении локальных карт препятствий. Для демонстрации

преимуществ разработанной SLAM-системы на основе CoreSLAM проводится сравнение с аналогами HectorSLAM и Gmapping.

**Замыкание циклов.** Алгоритм замыкания циклов, предложенный в работе [2], состоит из двух частей, которые направлены на уточнение позиции управляемого объекта, предсказанной с помощью фильтра частиц по глобальной карте препятствий (карта, содержащая все данные, полученные с лидара). Первая часть сохраняет карту препятствий и текущую оценку позиции управляемого объекта на данной карте при условии, что объект находится в неисследованной области. Эта область определяется с помощью проверки принадлежности предсказанной позиции к некоторой окрестности уже сохранённых точек. Размер окрестности определяется эмпирически и задаётся в конфигурационном файле. В случае попадания предсказанной позиции в окрестность сохранённой точки выполняется вторая часть алгоритма замыкания циклов, которая проводит повторную локализацию по соответствующей сохранённой карте. Поскольку точность карты препятствий связана с погрешностью оценки позиции объекта и погрешность накапливается со временем, ранее сохранённая карта не менее точна, чем глобальная. Таким образом, проведя повторную оценку позиции по сохранённой карте, можно сократить накопленную ошибку оценки позиции объекта.

Недостаток данного подхода — большой расход оперативной памяти, связанный с хранением глобальных карт препятствий. Одна карта размером  $20 \times 20$  м с разрешением 1 см/пиксель занимает 8 МБ памяти вычислительного устройства вне зависимости от содержания, что является характерным для такого подхода представления карты. Для решения этой проблемы было предложено в алгоритме замыкания циклов сохранять не глобальные карты препятствий с обработанными данными лидара, а локальные, которые содержат некоторый набор сырых данных с лидара и позиции управляемого объекта в момент сбора информации.

Введение локальных карт в алгоритм замыкания циклов приводит к проблеме, связанной с повторной локализацией управляемого объекта по сохранённой карте. Теперь нельзя использовать реализованный фильтр частиц, так как функция для оценки веса частиц требует наличия карты с определённым представлением данных. Поэтому было предложено при повторной локализации управляемого объекта использовать метод выравнивания сканов, основанный на итеративном алгоритме ближайших точек. Для этого была выбрана библиотека с открытым исходным кодом и BSD-лицензией libPointMatcher [3], в которой реализованы различные ИСР-алгоритмы для сведения к минимуму разницы между двумя наборами точек.

Новый алгоритм замыкания циклов также состоит из двух частей. Первая часть сохраняет текущие необработанные данные с лидара в локальную карту относительно предсказанной позиции в фильтре частиц при условии, что объект находится в неисследованной области. Такая область определяется с помощью проверки принадлежности предсказанной позиции к некоторой окрестности сохранённых локальных карт. Размер локальной карты ограничен максимальным количеством сканов, которыми она может обладать, и задаётся в конфигурационном файле. В случае попадания предсказанной позиции в окрестность локальной карты выполняется вторая часть алгоритма замыкания циклов, которая проводит повторную локализацию с помощью метода выравнивания текущего скана относительно сохранённой локальной карты.

**Тестирование разработанной SLAM-системы и сравнение с аналогами.** Для проведения тестирования реализованной SLAM-системы применялся виртуальный симулятор автономного транспортного средства с наличием лидара и одометра. Помимо симулятора также использовалось виртуальное окружение, что позволило определить размеры возникающих погрешностей при локализации управляемого объекта и корректность по-

Таблица 1

## Точность локализации объекта при использовании замыкания циклов и без него

Тип разработанной системы	Среднее отклонение координат, мм	Средне-квадратичное отклонение координат, мм	Среднее отклонение ориентации, град	Средне-квадратичное отклонение ориентации, град
SLAM-система с замыканием циклов на основе фильтра частиц	26,352	15,485	0,124	0,103
SLAM-система с замыканием циклов на основе ICP-подхода	72,952	36,278	0,656	0,191
SLAM-система без дополнительных модулей*	374,698	447,061	2,553	2,514

\*В случае работы реализованной SLAM-системы с отключёнными дополнительными модулями отличие от системы CoreSLAM состоит только в исправлении технических ошибок реализации.

строения карты препятствий. Модельные эксперименты проводились в окружении, состоящем из трёх связанных помещений, содержащих статические объекты.

Результаты тестирования (погрешности позиции и ориентации объекта) алгоритмов замыкания циклов представлены в табл. 1 (рассматривается случай отсутствия одометра и отключённого алгоритма предсказания позиции). Следует отметить, что при тестировании системы с применением первого подхода замыкания циклов на основе фильтра частиц расход оперативной памяти составил 1 ГБ (размер глобальной карты  $20 \times 20$  м, разрешение 1 см/пиксель), в то время как использование второго подхода на основе ICP-метода позволило сократить расход памяти до 200 МБ.

Теперь проведём сравнение точности локализации управляемого объекта и построения карты окружающей местности с аналогами разработанной SLAM, а именно с HectorSLAM [4] и Gmapping [5], реализованными в ROS (Robot Operating System — фреймворк для программирования роботов, ориентированный на Linux-подобные системы). Для начала рассмотрим поведение SLAM-систем на данных от симулятора автономного транспортного средства. Система HectorSLAM, как и разработанная SLAM-система, использует только данные лидара для локализации и построения карты, в то время как Gmapping получает начальное предсказание позиции управляемого объекта, рассчитанное с помощью информации с одометра.

Результаты первого этапа тестирования систем на данных от симулятора без наличия шума представлены в табл. 2. Несмотря на использование довольно точных данных лидара и одометра в виртуальном окружении, в нескольких экспериментах в системе Gmapping происходил сбой карты препятствий, что способствовало накоплению ошибки локализации. Результаты этих экспериментов не были включены в табл. 2.

Второй этап тестирования заключался в добавлении шума с нормальным распределением в данные лидара, полученные от симулятора. В спецификации на лидар URG-04LX-

Таблица 2

**Точность локализации SLAM-систем  
при тестировании на данных от симулятора без шума**

Тип системы	Среднее отклонение координат, мм	Средне-квадратичное отклонение координат, мм	Среднее отклонение ориентации, град	Средне-квадратичное отклонение ориентации, град
Разработанная SLAM-система	27,89	16,76	0,116	0,1
HectorSLAM	19,821	39,033	0,135	0,143
Gmapping	126,29	93,385	0,242	0,33

Таблица 3

**Точность локализации SLAM-систем  
при тестировании на данных от симулятора с наличием шума 1 % в данных лидара**

Тип системы	Среднее отклонение координат, мм	Средне-квадратичное отклонение координат, мм	Среднее отклонение ориентации, град	Средне-квадратичное отклонение ориентации, град
Разработанная SLAM-система	27,49	12,597	0,107	0,088
HectorSLAM	50,834	27,611	0,153	0,107
Gmapping	199,97	126,438	0,469	0,419

Таблица 4

**Точность локализации SLAM-систем  
при тестировании на данных от симулятора с наличием шума 2 % в данных лидара**

Тип системы	Среднее отклонение координат, мм	Средне-квадратичное отклонение координат, мм	Среднее отклонение ориентации, град	Средне-квадратичное отклонение ориентации, град
Разработанная SLAM-система	27,34	16,691	0,204	0,155
HectorSLAM	98,86	46,91	0,252	0,301
Gmapping	257,502	175,084	0,743	0,603

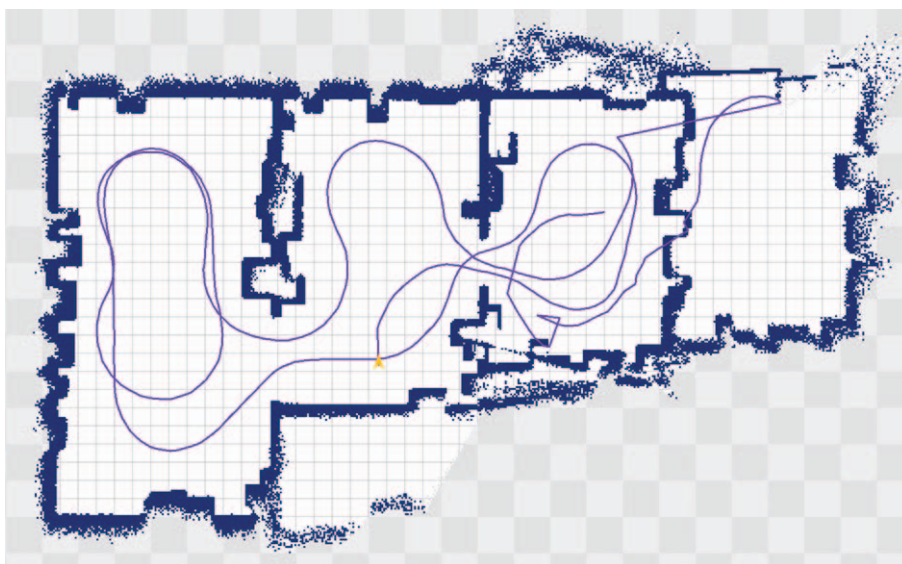


Рис. 1. Сбой в системе HectorSLAM при тестировании в виртуальном окружении с наличием шума в данных лидара

UG01 указывается, что при расстоянии от него до препятствия больше чем 1 м максимальная погрешность измерения может составлять 3 % от расстояния [6]. В соответствии с этим было предложено вносить ошибку в значения, определяющие расстояние от лидара до препятствий. Если полученная ошибка превосходит три процента от измеряемого расстояния, то её величина ограничивается этими тремя процентами. Как видно из табл. 3 и 4, добавление шума (шум имеет нормальное распределение со среднеквадратичным отклонением равным 1 и 2 % соответственно от расстояния до препятствия) в данные лидара приводит к ухудшению локализации управляемого объекта в системах HectorSLAM и Gmapping, что нельзя сказать о предлагаемой SLAM-системе. Особое представление карты препятствий позволяет избежать сильного влияния шума в данных лидара на локализацию объекта. Кроме того, в одном модельном эксперименте в системе HectorSLAM произошёл сбой карты (рис. 1), что привело к аварийному завершению программы.

Также исследовалось поведение SLAM-систем в реальном окружении с использованием лидара URG-04LX-UG01. В связи с отсутствием одометра система Gmapping не участво-

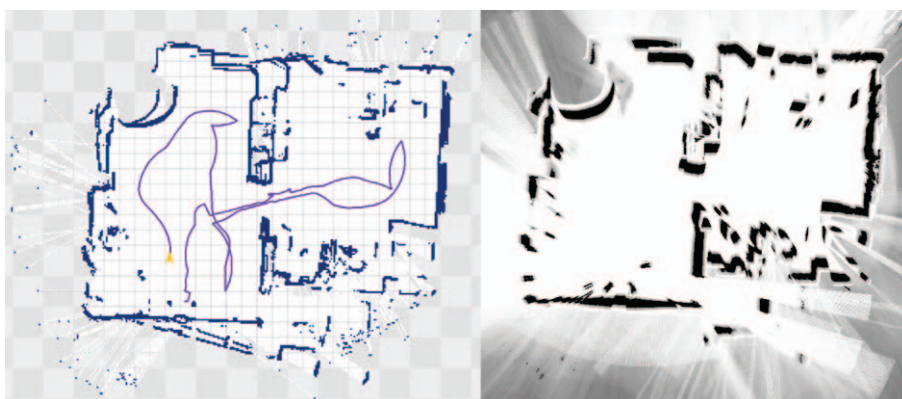


Рис. 2. Карты препятствий реального окружения на основе данных лидара URG-04LX-UG01. Слева приведена карта системы HectorSLAM, справа — карта разработанной SLAM-системы

вала в данном тестировании. Эксперимент позволил оценить только точность построенной карты препятствий (рис. 2).

**Заключение.** Представлен созданный алгоритм замыкания циклов, который позволил сократить расход оперативной памяти в сравнении с ранее предложенным алгоритмом с 1 ГБ до 200 МБ при использовании глобальной карты размером  $20 \times 20$  м с разрешением 1 см/пиксель. Также было проведено сравнение разработанной системы одновременной локализации и построения карты на основе CoreSLAM с аналогами HectorSLAM и Gmapping. Предлагаемая система показала хорошие результаты при длительном исследовании местности (с применением техники замыкания циклов) в реальном и виртуальном окружении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Steux B., El Hamzaoui O.** TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Control Automation Robotics & Vision. Singapore, 2010. P. 1975–1979.
2. **Барамия Д. А., Дьяков М. С., Лаврентьев М. М.** Разработка системы одновременной локализации и построения карты на основе данных с лидара и видеокamer // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. 2015. **13**, вып. 1. С. 5–15.
3. **ETH Zürich.** Autonomous Systems Lab. URL: <http://www.asl.ethz.ch/publications-and-sources/open-source-software.html> (дата обращения: 02.11.2017).
4. **Kohlbrecher S., von Stryk O., Meyer J., Klingauf U.** A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation // Proc. of the IEEE Intern. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics. Kyoto, Japan, 2011. P. 155–160.
5. **Grisetti G., Stachniss C., Burgard W.** Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters // IEEE Trans. Robotics. 2007. **23**, N 1. P. 34–46.
6. **Distance Data Output/URG-04LX-UG01.** Hokuyo Automatic Co., Ltd. 2014. URL: <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=166> (дата обращения: 02.11.2017).

*Поступила в редакцию 23 марта 2017 г.*

---