

Телевизионные системы, передача и обработка изображений

УДК 004.896, 004.942

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИКАЦИЙ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Антипов Владимир Алексеевич

аспирант кафедры «Инфокоммуникации и радиофизика» физического факультета
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова».

E-mail: valant777@gmail.com.

Коковкина Вера Андреевна

ассистент кафедры «Инфокоммуникации и радиофизика» физического факультета
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова».

E-mail: thief_rus@yahoo.com.

Кирнос Василий Павлович

старший преподаватель кафедры «Инфокоммуникации и радиофизика» физического факультета
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова».

E-mail: crafter76@gmail.com.

Приоров Андрей Леонидович

доктор технических наук, профессор кафедры «Инфокоммуникации и радиофизика» физического
факультета ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова».

E-mail: andcat@yandex.ru.

Гурьянов Егор Дмитриевич

аспирант кафедры «Инфокоммуникации и радиофизика» физического факультета
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова».

E-mail: guryanoved@yandex.ru.

Адрес: 150003, Российская Федерация, г. Ярославль, ул. Советская, д. 14.

Аннотация: Рассматриваются вопросы улучшения алгоритма одновременной локализации и картографирования с использованием модификаций расширенного фильтра Калмана (EKF-SLAM). Приводится описание базовой формы такого алгоритма и двух его модификаций для работы на больших картах: алгоритм EKF-SLAM с адапционным диапазоном наблюдения и алгоритм EKF SLAM «разделяй и властвуй». Первый алгоритм подразумевает использование локальной круговой карты с меняющимся радиусом для текущей оценки координат в сочетании с построением глобальной карты. Во втором алгоритме создается множество локальных карт, которые затем последовательно объединяются для формирования глобальной карты. Также приводится исследование всех трёх описанных алгоритмов и их сравнение.

Ключевые слова: алгоритм одновременной локализации и картографирования, расширенный фильтр Калмана, оценка координат, навигационная система, автономный мобильный робот, ковариационная матрица, адапционный диапазон наблюдения, локальная карта, квадратичная вычислительная сложность, глобальная карта.

Введение

Проблема одновременной локализации и картографирования (SLAM) является фундаментальной задачей для создания автономных мобильных роботов и является базовым методом

для многих навигационных систем, установленных на мобильных объектах. Она связана с построением карты неизвестного пространства мобильным объектом во время навигации по этой строящейся карте. В основе любого мето-

да SLAM лежит возможность измерять расстояние до объектов окружающего пространства и оценивать изменение своего положения относительно них (рис. 1) [1, 2].

На сегодняшний день существует множество различных подходов к решению задачи SLAM. С точки зрения аппаратных средств основой служит использование разных типов сенсоров, к которым, прежде всего, относятся лидары, сонары и видеокамеры. Из программных методов одним из наиболее распространённых подходов является использование расширенного фильтра Калмана (EKF-SLAM) [3–9].

Целью работы является исследование алгоритмов на основе расширенного фильтра Калмана для навигации автономной мобильной роботизированной платформы, оснащённой лазерной сканирующей системой, в задаче одновременной локализации и картографирования.

Описание работы стандартного алгоритма EKF-SLAM

Алгоритм EKF-SLAM успешно используется для построения небольших карт. Однако поскольку он имеет квадратичную вычислительную сложность обновления ковариационной матрицы на каждом шаге, использование его для больших – начиная с некоторого размера – карт сопряжено с серьёзными вычислительными трудностями. Из-за этого большой интерес для исследователей и разработчиков представляют различные модификации алгоритма EKF-SLAM.

Рассмотрим два усовершенствованных алгоритма EKF-SLAM: алгоритм EKF-SLAM с

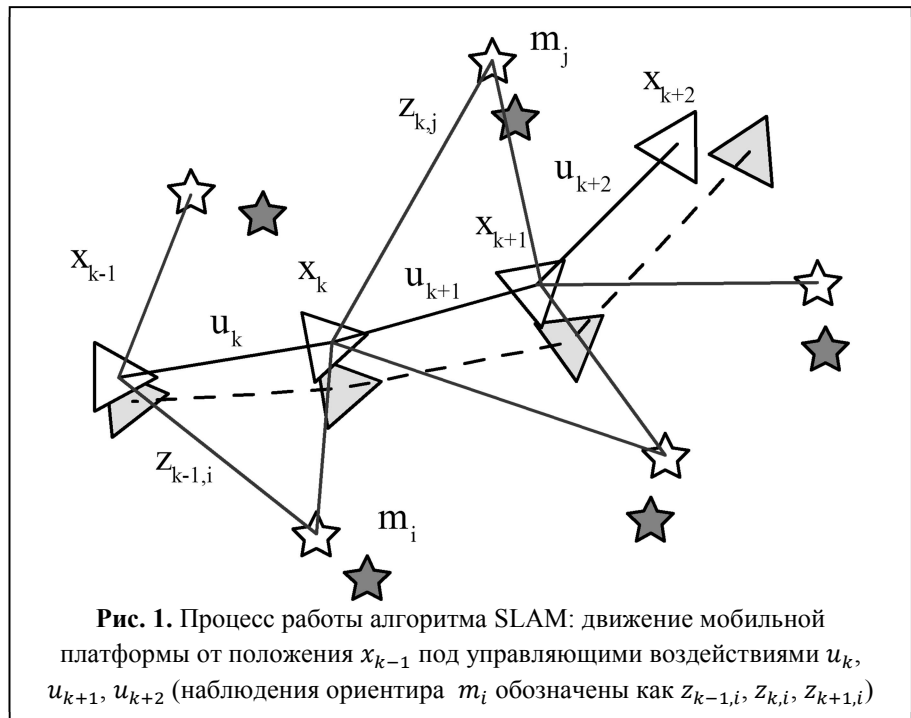


Рис. 1. Процесс работы алгоритма SLAM: движение мобильной платформы от положения x_{k-1} под управляющими воздействиями u_k , u_{k+1} , u_{k+2} (наблюдения ориентира m_i обозначены как $z_{k-1,i}$, $z_{k,i}$, $z_{k+1,i}$)

адаптационным диапазоном наблюдения и алгоритм EKF-SLAM с разделением и объединением (алгоритм «разделяй и властвуй») [10, 11].

В алгоритме EKF-SLAM карта будет представлять собой вектор состояния:

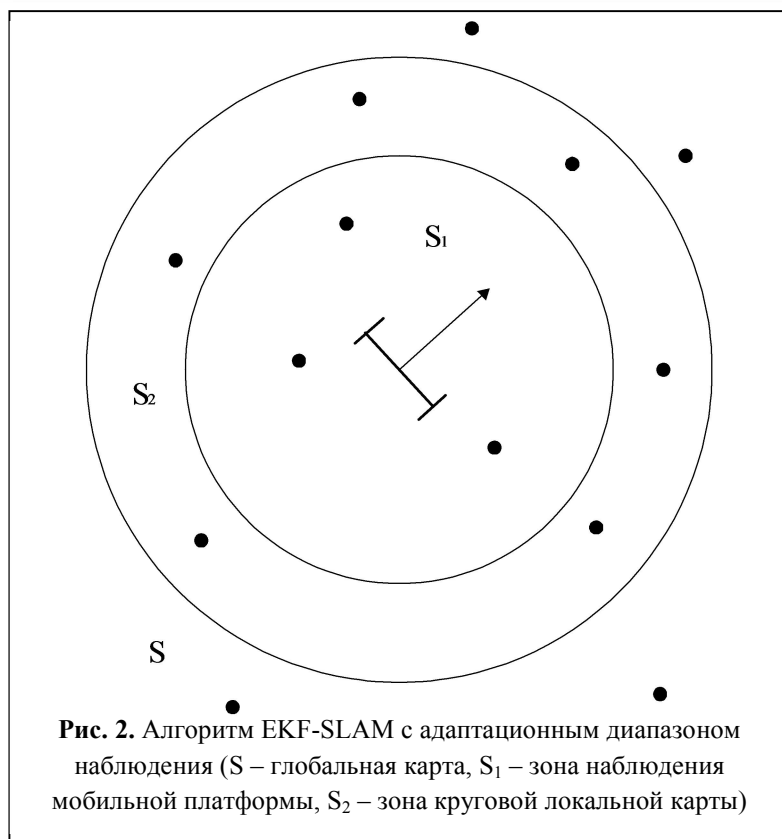
$$x_k = \mathbf{X}_k + \eta_k,$$

где $x = [x_r^T, x_1^T, x_2^T \dots x_N^T]^T$, где, в свою очередь, $x_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ или $x_r = [x_r, y_r, z_r, \theta_r]^T$ – оценка позиции мобильной платформы и $x_i = [x_i, y_i]^T$ или $x_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ – оценка положения i -го ориентира; \mathbf{X}_k – вектор истинного состояния; η_k – вектор ошибки оценки состояния; k – момент времени.

Оценка ошибки ковариации $P_{k|k} = E[\eta_k, \eta_k^T]$ имеет следующий вид:

$$P_{k|k} = \begin{bmatrix} p^{rr} & p^{ri} & \dots & p^{rN} \\ p^{1r} & p^{11} & \dots & p^{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p^{Nr} & p^{N1} & \dots & p^{NN} \end{bmatrix}.$$

Подматрицы p^{rr} , p^{ri} , p^{ii} представляют собой ковариацию между ошибкой положения мобильной платформы и мобильной платформой, мобильной платформы и ориентирами, ориентирами и ориентирами. Карта представляет собой вектор состояния x с соответствующей оценкой ошибки ковариации P в каждый



k -й момент времени. Расширенный фильтр Калмана оценивает вектор состояния x и ковариационную матрицу P с помощью измерения z . Оценка происходит с помощью двух шагов: прогнозирования и корректировки.

Формировать вектор состояния и ковариационную матрицу можно не только путём добавления последовательно новых ориентиров, как в базовом алгоритме EKF-SLAM, но и некоторыми другими способами [9, 12].

Алгоритм EKF-SLAM с адапционным диапазоном наблюдения

Идея алгоритма EKF-SLAM с адапционным диапазоном наблюдения состоит в использовании локальной круговой карты для текущей оценки координат мобильной платформы и локализации зоны с последующим обновлением глобальной карты (рис. 2) [10].

Локальная область должна адаптивно изменяться, так как при невыполнении этого условия возможны следующие проблемы:

1) Число ориентиров в области локальной карты может оказаться малым для уточнения

позиции мобильной платформы.

2) Число ориентиров в области локальной карты может оказаться слишком большим, что приведёт к уменьшению скорости вычислений.

3) Если диапазон наблюдения является слишком большим, то достоверность наблюдения отдельных ориентиров снижается, что негативно повлияет на точность позиционирования мобильной платформы.

В соответствии с этим радиус локальной карты изменяется по следующим правилам:

1) Если число ориентиров в наблюдаемой области меньше, чем необходимое число для надёжной коррекции положения мобильной платформы, и радиус области меньше, чем максималь-

ный радиус, то радиус локальной карты увеличивается.

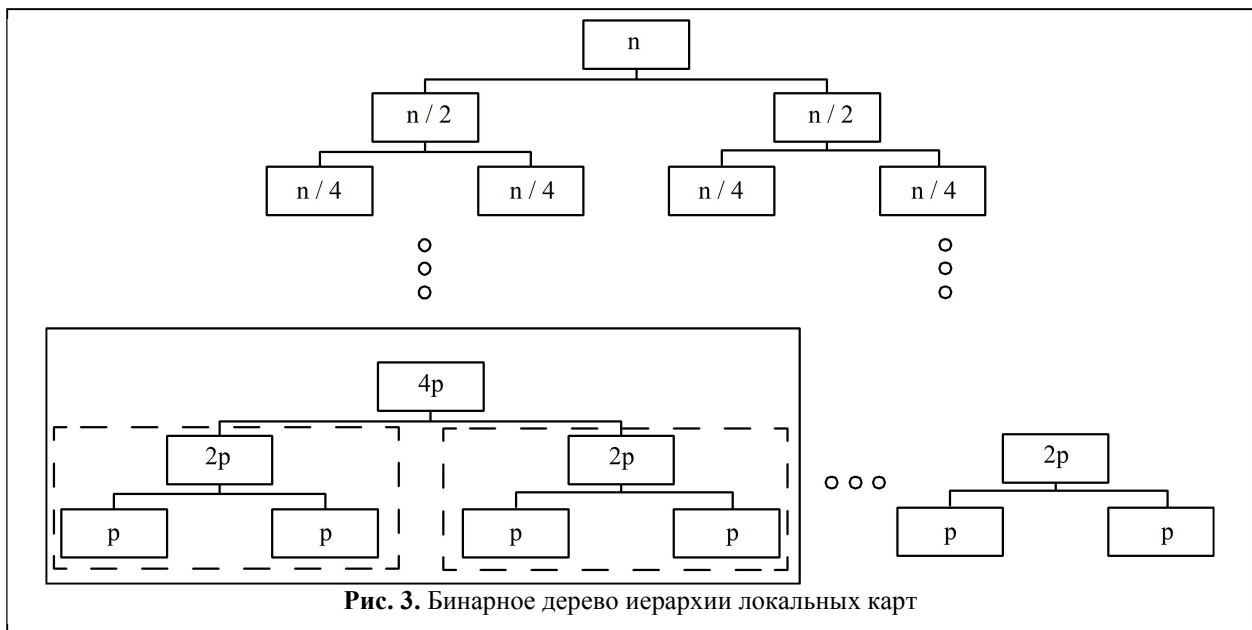
2) Если число ориентиров больше максимально допустимого числа и радиус локальной карты больше, чем минимальный радиус, то радиус локальной карты уменьшается.

3) Во всех остальных случаях радиус локальной карты остается неизменным.

Алгоритм EKF-SLAM с разделением и объединением («разделяй и властвуй»)

Основная идея алгоритма EKF-SLAM с разделением и объединением заключается в том, чтобы создать последовательность локальных карт определённого размера, а затем объединить их последовательно. Для формирования глобальной карты алгоритм объединяет локальные карты с помощью двоичного дерева (рис. 3) [11].

Для формирования локальных карт с размерами до некоторого фиксированного максимального используется стандартный алгоритм EKF-SLAM. Для формирования глобальной карты, полученные m локальных карт объеди-



няются в $m/2$ локальных карт двойного размера, которые, в свою очередь, объединяются в $m/4$ локальных карт четырехкратного размера, и так далее до тех пор, пока окончательная карта размера n не будет результатом объединения двух карт размером $n/2$. Выполнение этого процесса сводится к обходу двоичного дерева и может быть реализовано с использованием стека карт.

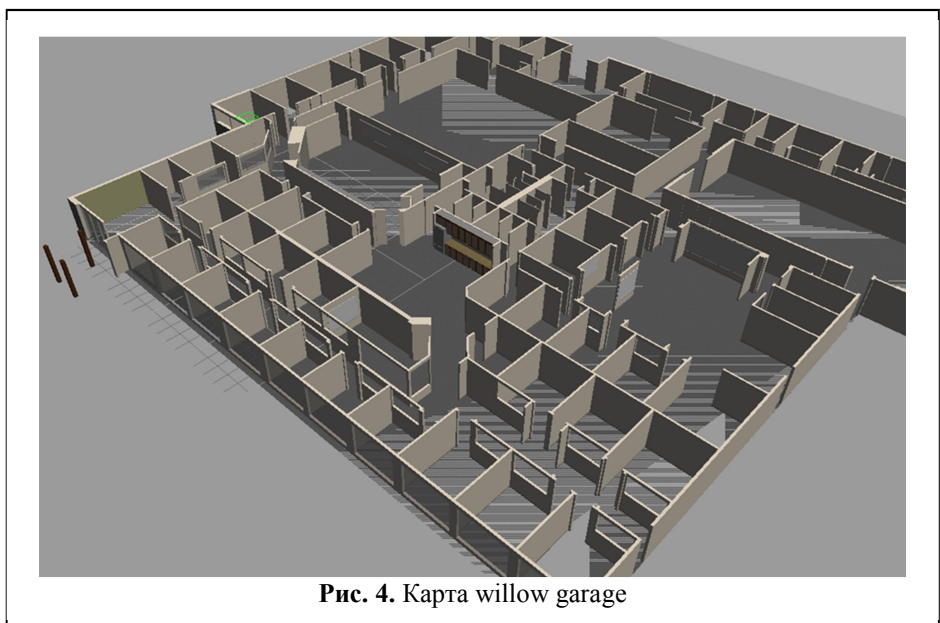
Исследование работы алгоритмов

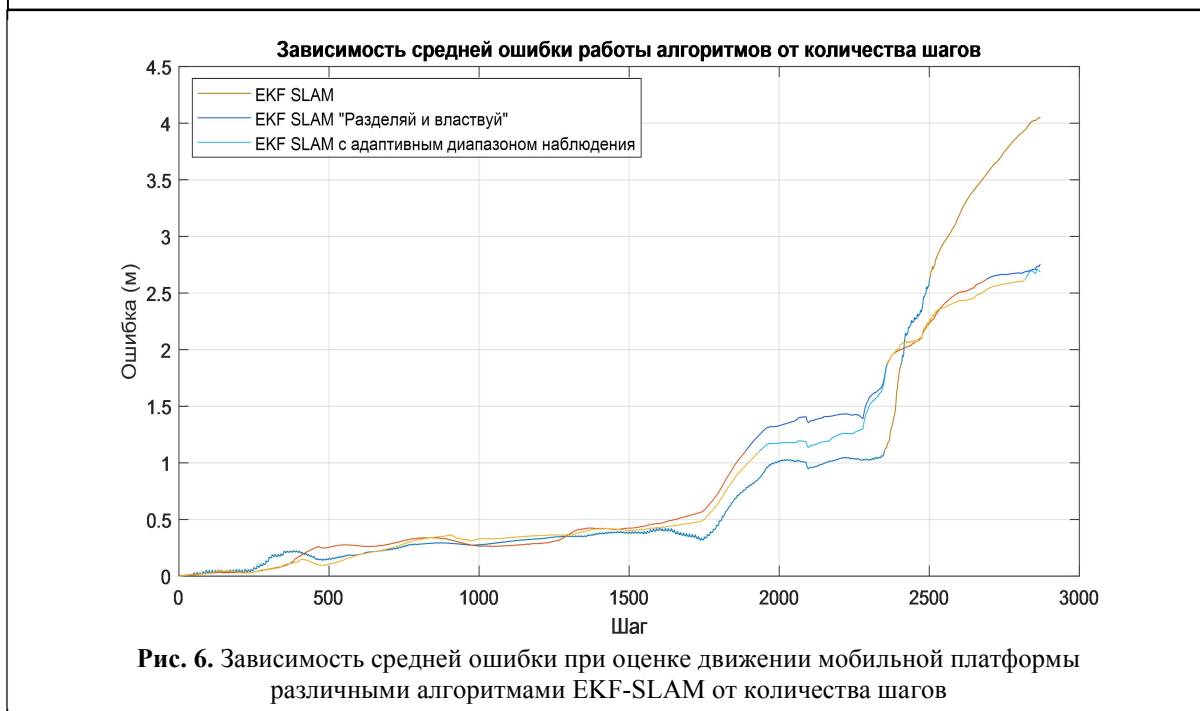
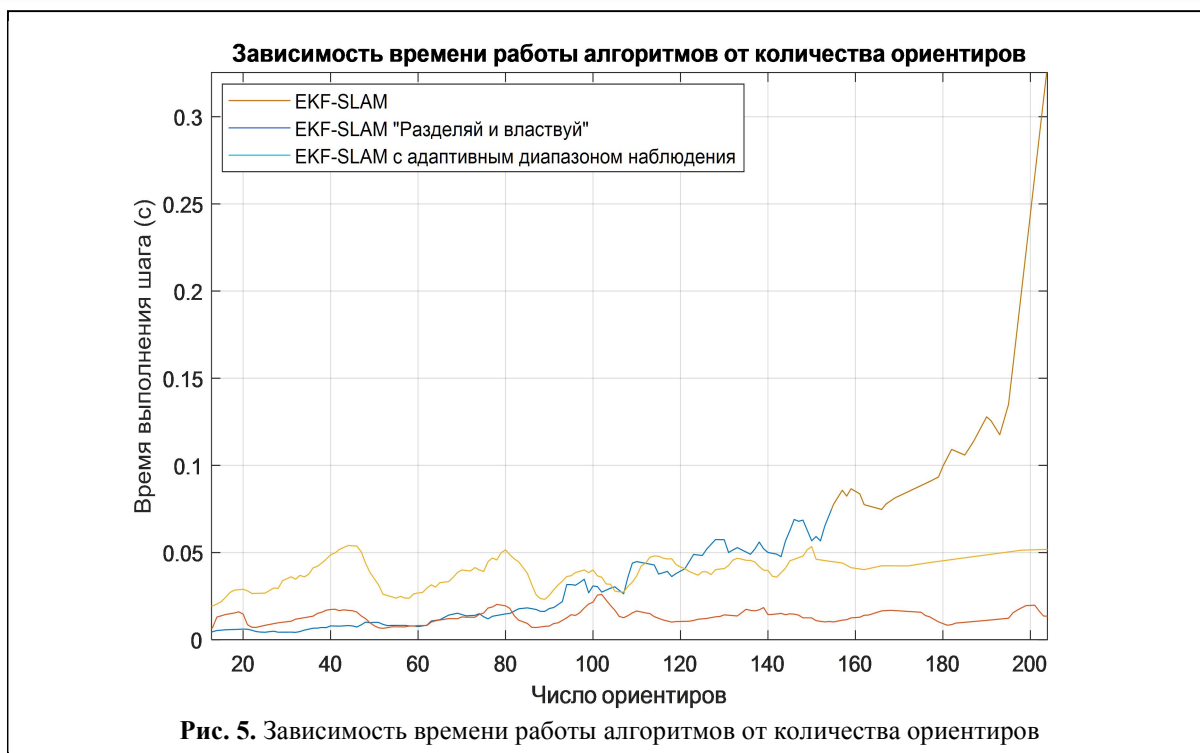
Исследования проводились в виртуальной среде Gazebo. В смоделированной карте willow garage (рис. 4) проводился один заезд автономной мобильной платформы и записывались показания лидара. Затем по записанным данным запускали стандартный алгоритм EKF-SLAM и его модификации [13, 14].

По графику (рис. 5) видно, что стандартный алгоритм EKF-SLAM имеет квадратичную вычислитель-

ную сложность, а остальные – линейную, в соответствии с теоретическими выкладками. Также стоит отметить, что у алгоритма EKF-SLAM с разделением и объединением наблюдается пилообразная форма соответствующего графика, что связано с тем, что он во время работы строит последовательно несколько локальных карт фиксированного размера.

Также при большом количестве шагов ошибка определения месторасположения мобильной платформы у стандартного алгоритма EKF-SLAM по сравнению с другими алгоритмами возрастает (рис. 6).





В таблице 1 приведены результаты сравнения трёх исследуемых алгоритмов по величине СКО всех трёх координат. Видно, что наиболее эффективным с точки зрения точности является алгоритм EKF-SLAM с адаптационным диапазоном наблюдения. Применение этого алгоритма позволяет повысить точность определе-

ния месторасположения автономной мобильной платформы на 14,9 % по сравнению со стандартным алгоритмом EKF-SLAM. Алгоритм EKF-SLAM «разделяй и властвуй» сопоставим с лидером по двум из трёх координат, лишь незначительно уступая по третьей.

Таблица 1. Сравнение трёх исследуемых алгоритмов EKF-SLAM по величине СКО координат

	EKF-SLAM	EKF-SLAM «разделяй и властвуй»	EKF-SLAM с адаптивным радиусом наблюдения
СКО координаты X	0,281	0,207	0,195
СКО координаты Y	0,096	0,156	0,16
СКО координаты θ	0,032	0,02	0,02

Заключение

Исследование времени работы модифицированных алгоритмов EKF-SLAM подтверждает, что стандартный алгоритм EKF-SLAM имеет квадратичную вычислительную сложность, а улучшенные алгоритмы – уже линейную. Также подтверждается, что при построении малых карт точность всех трёх алгоритмов EKF-SLAM сопоставима, но при построении больших карт стандартный алгоритм EKF-SLAM проигрывает своим модификациям. Это связано с тем, что в улучшенных алгоритмах при вычислении матриц состояния и ковариации используются небольшое число ориентиров, что приводит к уменьшению использования ложных ориентиров.

Проведены исследования по сравнению двух модификаций алгоритма EKF-SLAM. Установлено, что наиболее эффективным как с точки зрения скорости, так и с точки зрения точности является алгоритм EKF-SLAM с адаптационным диапазоном наблюдения.

Стоит также отметить, что улучшенный алгоритм EKF-SLAM «разделяй и властвуй» во время построения глобальной карты может сильно ошибаться при слиянии построенных локальных карт. Эта ошибка связана с сильной зависимостью от результата работы алгоритма поиска соответствия ориентиров.

Литература

1. Burgard W. Mapping with mobile robots, 2004.
2. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2005. 667 p.
3. Newman P.M. EKF Based Navigation and SLAM. SLAM Summer School. Background Materials and Notes, Oxford University, Oxford. 2006.
4. Bailey P., Beckler M., Hoglund R., Saxton J. 2d simultaneous localization and mapping [Электрон-

ный ресурс]. 2008. Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/82c6/f386767d992b9edd2f56490245e30c80d6da.pdf> (дата доступа 05.11.2019).

5. Naminski M.R. An analysis of simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithms. Macalester College, Honors Projects Mathematics, Statistics, and Computer Science. 2013. 39 p.

6. Hiebert-Treuer B. An introduction to robot SLAM (Simultaneous localization and mapping). 75 p.

7. Dissanayake G., Durrant-Whyte H., Bailey T. A computationally efficient solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings, Australia, 2000. Pp. 1009–1014.

8. Welch G., Bishop G. An introduction to the Kalman filter. Technical Report TR 95-041, University of North Carolina at Chapel Hill, 2006. 16 p.

9. Negenborn R. Robot localisation and kalman filters: On finding your position in a noisy world. Master's thesis, Utrecht University, 2003. 156 p.

10. Гэн К., Чулин Н.А. Алгоритм навигации беспилотного летательного аппарата на основе улучшенного алгоритма одновременной локализации и картографирования с адаптивным локальным диапазоном наблюдения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 3. С. 76–94.

11. Paz L.M., Jensfelt P., Tardos J.D., Neira J. EKF SLAM Updates in $O(n)$ with Divide and Conquer SLAM // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 10–14 April 2007. Pp. 1657–1663.

12. Zunino G. Simultaneous Localization and Mapping for Navigation in Realistic Environments. M.: KTH, 2002. 187 с.

13. Silva I., Silva R., Rosa J., Alveirinho V., Mendes J., Przydatek M. EKF-based localization with LRF [Электронный ресурс] // Instituto Superior Técnico, Autonomous Systems, Project Report, December 2015. Режим доступа: <https://ru.overleaf.com/articles/ekf-based-localization-with-lrf/btqmvvxzspth> (дата доступа 5.11.2019).

14. Li Y., Olson E. Extracting general-purpose features from LIDAR data // Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Anchorage, AK, USA, May 2010.

Поступила 6 ноября 2019 г.

English

PROBLEM SOLUTION OF SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING USING MODIFICATIONS OF EXTENDED KALMAN FILTER

Vladimir Alekseyevich Antipov – Postgraduate Student, Department of Infocommunications and Radiophysics, Physics Faculty, P.G. Demidov Yaroslavl State University.

E-mail: valant777@gmail.com.

Vera Andreevna Kokovkina – Teaching Assistant, Department of Infocommunications and Radiophysics, Physics Faculty, P.G. Demidov Yaroslavl State University.

E-mail: thief_rus@yahoo.com.

Vasily Pavlovich Kirnos – Senior Lecturer, Department of Infocommunications and Radiophysics, Physics Faculty, P.G. Demidov Yaroslavl State University.

E-mail: crafter76@gmail.com.

Andrey Leonidovich Priorov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Infocommunications and Radiophysics, Physics Faculty, P.G. Demidov Yaroslavl State University.

E-mail: andcat@yandex.ru.

Yegor Dmitriyevich Guryanov – Postgraduate Student, Department of Infocommunications and Radiophysics, Physics Faculty, P.G. Demidov Yaroslavl State University.

E-mail: guryanoved@yandex.ru.

Address: 150003, Russian Federation, Yaroslavl, Sovetskaya street, 14.

Abstract: SLAM (simultaneous localization and mapping) is currently one of promising, rapidly developing and popular trend in development of autonomous mobile systems. SLAM goal involves map generation of unknown area while navigating and using the map that is being generated. This problem is fundamental for developing, for example, autonomous mobile robots. Besides, it is a basic method for many navigation systems intended for a timely response to changes in their environment. Such systems are currently in high demand in industry, science, education, medicine, military matters, security and other areas. The basis of any SLAM presupposes ability to measure distance to objects surrounding a moving object in space and to estimate its changing position relatively to them. Today, there are many various approaches to SLAM problem using different sensor types. One of the main approaches to this problem is using extended Kalman filter (EKF-SLAM). Although EKF-SLAM algorithm is successfully used to generate small maps, it is seldom applied to large maps due to quadratic computational complexity of updating covariance matrix used in algorithm at each step. Therefore, this research paper considers improving EKF-SLAM algorithm, which is of great research and practical interest. The basic form of EKF-SLAM algorithm is described. Two its modifications are considered for large maps: EKF-SLAM algorithm with adaptive surveillance range and EKF-SLAM divide-and-conquer algorithm. The first algorithm presupposes local circular map with variable radius for current coordinate estimation together with global map generation. Divide-and-conquer EKF-SLAM algorithm has a set of local maps created, which are then sequentially combined to form a global map. Besides, investigation of all three described algorithms and their comparison is given.

Keywords: algorithm of simultaneous localization and mapping, extended Kalman filter, coordinate estimation, navigation system, autonomous mobile robot, covariance matrix, adaptive surveillance range, local map, quadratic computational complexity, global map.

References

1. Burgard W. Mapping with mobile robots, 2004.
2. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2005. 667 p.
3. Newman P.M. EKF Based Navigation and SLAM. SLAM Summer School. Background Materials and Notes, Oxford University, Oxford. 2006.
4. Bailey P., Beckler M., Hoglund R., Saxton J. 2d simultaneous localization and mapping [Electronic source]. 2008. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/82c6/f386767d992b9edd2f56490245e30c80d6da.pdf> (access date 05.11.2019)
5. Naminski M.R. An analysis of simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithms. Macalester College, Honors Projects Mathematics, Statistics, and Computer Science. 2013. 39 p.
6. Hiebert-Treuer B. An introduction to robot SLAM (Simultaneous localization and mapping). 75 p.

7. *Dissanayake G., Durrant-Whyte H., Bailey T.* A computationally efficient solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings, Australia, 2000. Pp. 1009–1014.
8. *Welch G., Bishop G.* An introduction to the Kalman filter. Technical Report TR 95-041, University of North Carolina at Chapel Hill, 2006. 16 p.
9. *Negenborn R.* Robot localisation and kalman filters: On finding your position in a noisy world. Master's thesis, Utrecht University, 2003. 156 p.
10. *Geng Ke, Chulin A.N.* UAV Navigation Algorithm Based on Improved Algorithm of Simultaneous Localization and Mapping with Adaptive Local Range of Observations. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2017. No. 3. Pp. 76–94.
11. *Paz L.M., Jensfelt P., Tardos J.D., Neira J.* EKF SLAM Updates in $O(n)$ with Divide and Conquer SLAM. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 10–14 April 2007. Pp. 1657–1663.
12. *Zunino G.* Simultaneous Localization and Mapping for Navigation in Realistic Environments. Moscow.: KTN, 2002. 187 p.
13. *Silva I., Silva R., Rosa J., Alveirinho V., Mendes J., Przydatek M.* EKF-based localization with LRF [Electronic source]. Instituto Superior Técnico, Autonomous Systems, Project Report, December 2015. URL: <https://ru.overleaf.com/articles/ekf-based-localization-with-lrf/btqmvvxzspth> (access date 5.11.2019).
14. *Li Y., Olson E.* Extracting general-purpose features from LIDAR data // Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Anchorage, AK, USA, May 2010.