



Модифицированный NDT-алгоритм локализации и картографирования для SLAM-миссии в динамической среде

П.П. Трубин, А.А. Ибатуллин,

В.Г. Хомченко, Е.С. Гебель (Омский государственный технический университет)

Рассмотрены проблемы применения алгоритмов последовательной локализации в рамках решения навигационной задачи мобильного робота в динамической среде. Предложена модификация алгоритма Normal Distributions Transform (NDT) за счет дополнения его разработанным методом обновления карты на базе трассировки лучей. Исследовано качество, в том числе быстрдействие, работы программной реализации модифицированного NDT-алгоритма на тестовых и реальных данных.

Ключевые слова: NDT-алгоритм, SLAM, трассировка лучей, динамические препятствия, динамическое окружение, навигация мобильных роботов.

Введение

Навигация мобильных роботов — большая и быстро расширяющаяся область исследований, в которой заняты группы ученых многих стран мира. Пионерскими можно считать решения, разработанные для промышленных роботов. Некоторые из этих решений

в дальнейшем были развиты в целые программные комплексы. В качестве примера отметим программную библиотеку ARNL для ARIA фирмы MobileRobots Inc. Научные группы ведущих мировых университетов также разрабатывают свои комплексные решения как в коммерческой форме (продукт KARTO центра искусственного интеллекта Стэнфордского исследовательского института), так и в форме открытого доступа (open source), в частности, проект CARMEN — Carnegie-Mellon Robot Navigation Toolkit, созданный в университете Карнеги-Меллон и представляющий собой набор ПО для навигации роботизированной платформы (<http://carmen.sourceforge.net>). Наконец, особо отметим ставший современной базой любых исследовательских решений в области мобильной робототехники проект ROS (Robot Operating System — операционная система для роботизированных платформ, представляющая собой набор библиотек с исходным кодом, которые решают широкий круг робототехнических задач, в том числе и задачу навигации мобильной роботизированной платформы) (<http://www.ros.org>).

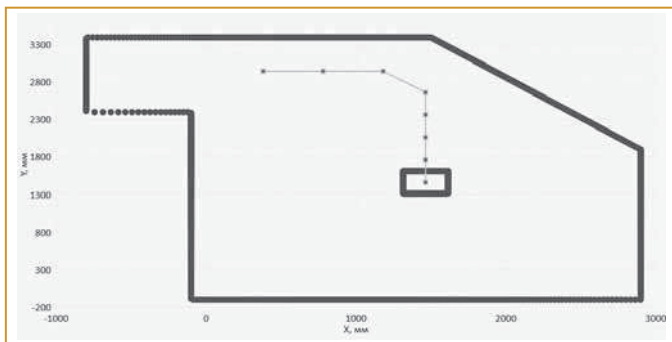


Рис. 1. Схема динамического окружения

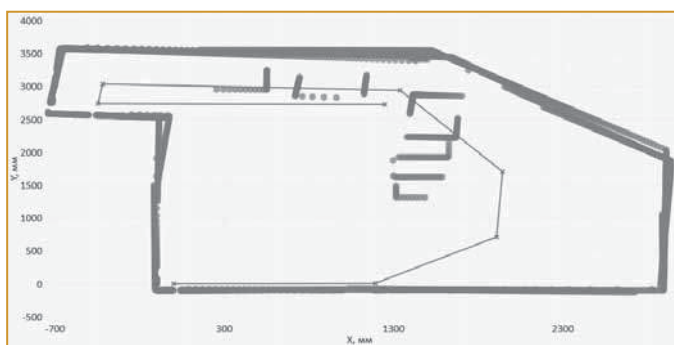


Рис. 2. Итоговый вид глобальной карты базового алгоритма

SLAM как необходимый этап навигационного алгоритма автономной миссии мобильного робота

SLAM (Simultaneous localization and mapping) — общее название для процедуры параллельно выполняемых локализации и картографирования в рамках навигационной системы. Под SLAM-миссией понимается решение задачи SLAM при реализации процесса функционирования системы управления мобильного робота. Существует множество раз-

личных SLAM-алгоритмов. Их можно разделять как по размерности (2-D, 3-D, Color, 6-D), так и по используемому математическому аппарату (ICP, EKF, Bayesian-based, NDT) [1, 2]. Но независимо от используемого в упомянутых работах подхода результатом всегда будет восстановленная позиция робота на построенной или уточненной карте окружения. Также не меняется положение SLAM-модуля в навигационном стеке: он всегда предшествует модулям построения маршрута и принятия решений. Следовательно, предельно возможное качество прокладыва-

емого маршрута и адекватность реакции на опасную ситуацию всегда ограничено данными, производимыми в результате SLAM-миссии [3].

SLAM-алгоритмы также можно классифицировать по наличию предварительно загруженной карты окружения [2]. При функционировании мобильного робота в ходе выполнения исследовательской миссии в среде с часто изменяющейся конфигурацией, например, в помещениях типа досуговый центр — возможно применение только алгоритмов без предварительно загруженной карты. Среди подобных алгоритмов вы-

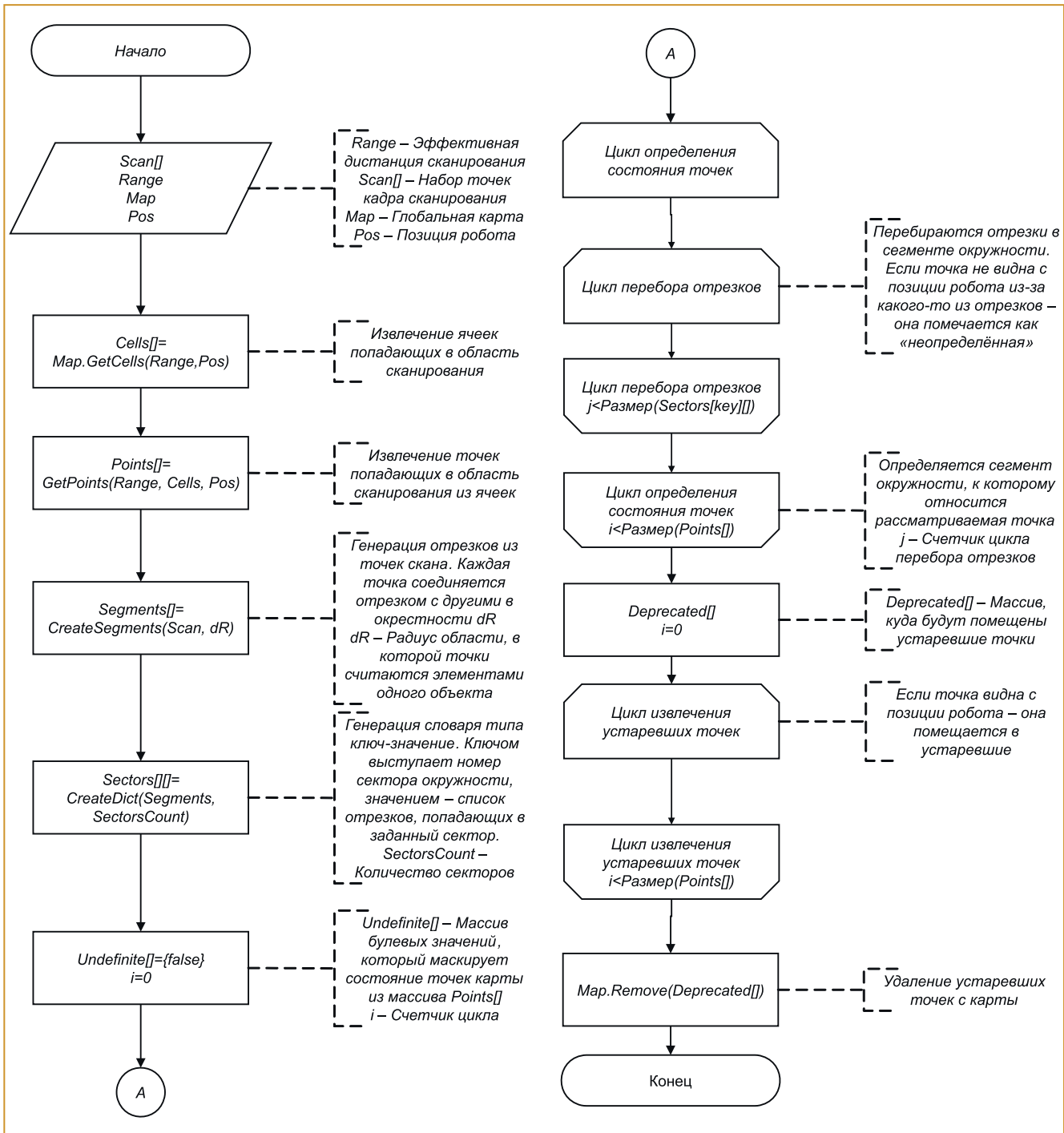


Рис. 3. Блок-схема алгоритма учета динамики среды

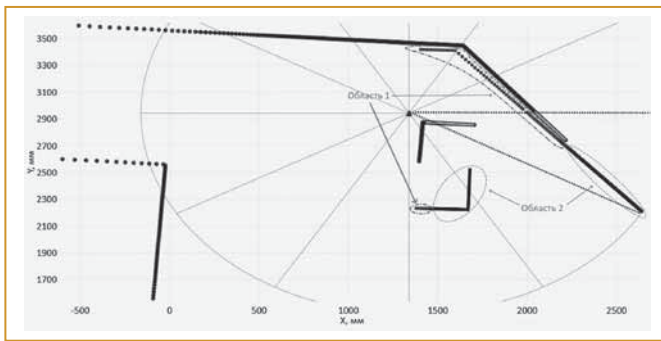


Рис. 4. Демонстрация работы алгоритма учета динамики среды

деляются: ICP [4, 5, 6], IDC [7], Hector Mapping [8], G-mapping [9], NDT [10]. Все эти алгоритмы предполагают последовательную локализацию, а результат их работы легко может быть преобразован в ячеистую карту занятости [1].

**Статическое и динамическое окружение.
Сложности и варианты решений**

Качество работы алгоритмов последовательной локализации в значительной степени зависит от наличия или отсутствия динамики окружения. В случае статического окружения, даже реализация простейшей версии алгоритма NDT [11] дает приемлемые результаты [12]. Особую важность результаты SLAM-

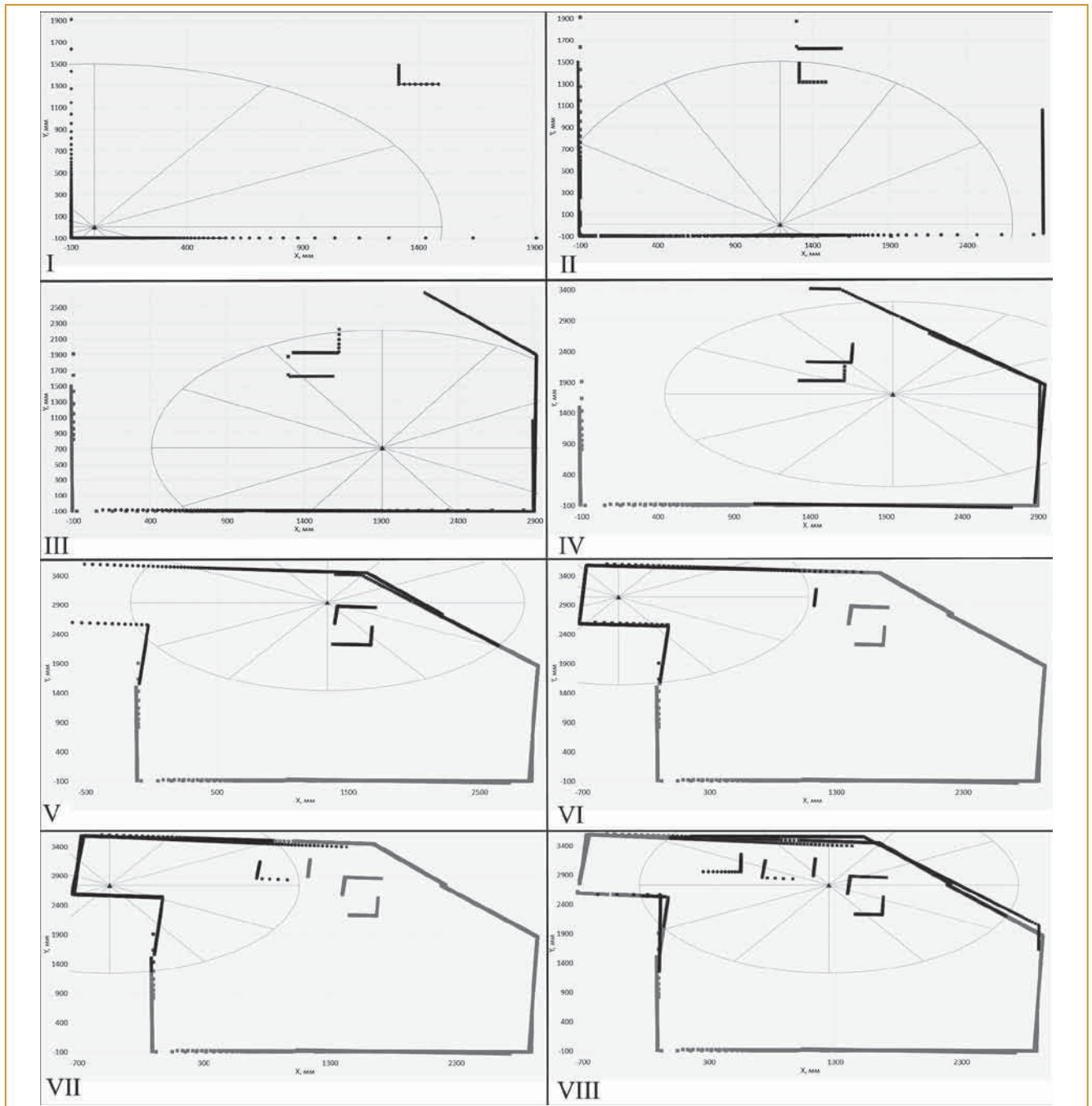


Рис. 5. Вид глобальной карты модифицированного NDT-алгоритма после обработки сканов: I-1, II-2, III-3, IV-4, V-5, VI-6, VII-7, VIII-8

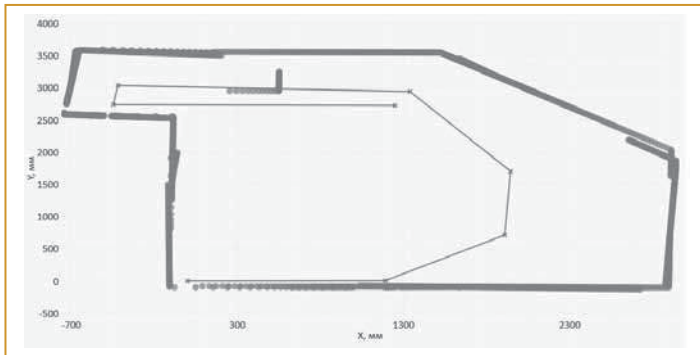


Рис. 6. Итоговый вид глобальной карты модифицированного NDT-алгоритма

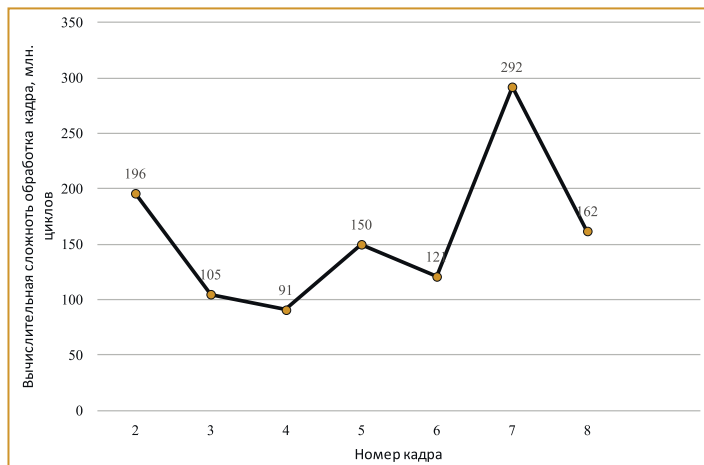


Рис. 7. Диаграмма вычислительной сложности модификации алгоритма

миссии приобретают при работе в недетерминированной динамической среде, содержащей движущиеся препятствия. В таких условиях необходим учет динамики среды для построения безопасного маршрута, который рассматривается в двух аспектах [3]:

- актуализация карты, то есть удаление данных о старом расположении движущихся объектов и введение данных о новом их расположении;
- определение кинематических характеристик объектов для прогноза будущего расположения объектов.

Предлагаемый в данной статье метод обновления карты на базе трассировки лучей обеспечивает учет динамики в первом аспекте и может быть использован с любым из алгоритмов последовательной локализации. Второй же аспект учета динамики, опираясь на решения первого, может быть использован для построения предиктивных моделей окружения и дальнейшей оптимизации прокладываемых маршрутов в рамках работы навигационной системы [3].

Анализ работы базового алгоритма в динамической среде

Для оценки качества работы базового алгоритма (здесь и далее под базовым алгоритмом подразумевается реализация алгоритма NDT, описанного в [10, 11]) используются данные сканирования с виртуального

полигона, на котором присутствует движущийся объект. На рис. 1 представлена схема динамического окружения, на которой изображены начальное положение динамического объекта и траектория его движения. Точками отмечены позиции объекта (его центральные точки) при генерации очередного кадра сканирования, а на рис. 2 — вид глобальной карты после обработки всех кадров сканирования (сканов) базовым алгоритмом.

Использование подобной карты как схемы, отражающей реальное окружение, невозможно в связи с наличием «следа» по пути движения объекта [13].

Специфическая особенность базового алгоритма, основанная на ограничении общего числа точек на карте [10, 11], позволяет лишь поддерживать четкость очертаний границ статического объекта при многократном сканировании его окрестностей.

Таким образом, появляется необходимость модификации базового алгоритма таким образом, чтобы учитывалась динамика среды.

Описание модификации базового подхода для учета динамики среды

Предлагаемая модификация NDT-алгоритма основывается на предположении, что объекты, находящиеся на карте в области сканирования, но не представленные на текущем скане, изменили свое положение. Естественно, что часть объектов может быть скрыта другими объектами. В таком случае нельзя с уверенностью утверждать, что данные о них не актуальны. Кроме того, объекты на границе дальности сканирования могут иметь размытые очертания, поэтому эффективный радиус сканирования следует считать несколько меньшим, чем предельная дальность используемого сканера.

Блок-схема модифицированного NDT-алгоритма представлена на рис. 3. Предлагаемая модификация впервые была описана в [13].

Рассмотрим работу предложенной модификации NDT-алгоритма.

На рис. 4 приводится графическая схема обработки очередного кадра сканирования на произвольной карте. Серым цветом окрашены точки скана. Черным — отрезки, которыми соединяются точки, считающиеся фрагментами одного объекта. Треугольник — это позиция робота. Вокруг позиции робота очерчена окружность — это эффективная область сканирования. Область разделена на сектора. Пунктиром выделен один из секторов и часть отрезков, которые относятся к этому сектору. В пределах эффективной области сканирования представлены точки карты. В области 1 обозначены точки, не представленные на текущем скане и считающиеся «устаревшими». В области 2 — точки, находящиеся в «тени» объектов скана, состояние которых не определено, и производить их удаление — преждевременно.

Таблица 1. Характеристики оборудования

Наименование компонента	Радиус сканирования, м	Погрешность измерения дистанции, мм	Погрешность измерения угловых параметров
RPLidarA2	12	2	1° (угол)
MPU-9250	-	-	0,01 °/с (угловая скорость)
AEDR-8710-102	-	-	3,6 ° (угол)

Таблица 2. Данные одометрии

Номер кадра сканирования	Перемещение, мм	Поворот, угловые градусы
1	0	0
2	2562	13,75
3	1151	-31,51
4	900	33,23
5	950	12,03
6	1710	71,05
7	1349	5,16
8	3961	4,01
9	4212	-1,38
10	2600	5,16
11	5400	-3,44
12	4250	-4,01
13	4183	-73,34

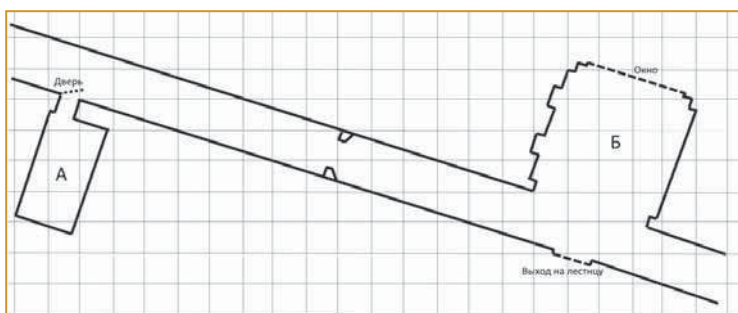


Рис. 8. Схема области испытаний

Проверка работы модифицированного NDT-алгоритма

Проверка работоспособности модифицированного NDT-алгоритма осуществляется на тестовом сценарии, использованном для проверки базового алгоритма (рис. 1). На рис. 5 представлен вид гло-

Таблица 3. Результаты определения параметров выравнивания сканов

Номер кадра сканирования	Вычисленное смещение, мм	Вычисленный поворот, град
1	0	0,0
2	2556,1	12,99
3	1142,4	-30,59
4	910	33,61
5	950,5	11,55
6	1718,7	71,25
7	1342,6	4,76
8	3966	5,33
9	4219	0,46
10	2595,8	4,48
11	5390,5	-4,08
12	4258,7	-3,13
13	4180	-73,84

Таблица 4. Вычислительные затраты на обработку сканов

Номер кадра сканирования	Вычислительная сложность, млн. циклов процессора	Реальное время вычислений на Intel Core i7-4710MQ, мс
1	81	33
2	168	67
3	212	84
4	641	256
5	229	91
6	204	81
7	367	145
8	122	47
9	110	43
10	448	173
11	117	46
12	110	43
13	402	160

бальной карты после добавления очередного кадра сканирования.

Серым цветом выделены точки последнего обработанного скана. Присутствуют дополнительные построения — окружность, поделенная на секторы, охватывающая эффективный радиус сканирования.

Введение эффективного радиуса сканирования, меньшего действительной дальности работы сканера, необходимо, чтобы избежать удаления чрезмерного объема данных с карты в связи с разреженностью точек на границах зоны сканирования.

Пример подобной разреженности можно наблюдать в левом нижнем углу изображения глобальной карты (рис. 5-III). Длинные участки стен, при значительном удалении вырождаются в группу точек с увеличивающимися интервалами. На схеме светло серыми квадратами обозначены точки глобальной карты, расположенные вне эффективного радиуса сканирования. Темно-серыми квадратами — расположенные внутри этой области и удаленные. А черными квадратами обозначены точки, находящиеся в пределах зоны анализа алгоритма учета динамики среды, но расположенные в «тени» объектов нового скана.

Разделение круговой зоны вокруг позиции робота и группировка отрезков по этим секторам также не случайны. Подобный подход необходим в связи с большим числом получающихся отрезков. При 1000 точек на скане число отрезков в худшем случае может составить 1 млн.

При сопоставимом числе точек карты (порядка 1000 ед.), для которых требуется определить состояние, операция поиска пересечения отрезков (рис. 3) может занимать порядка миллиарда итераций. Это недопустимая вычислительная сложность для алгоритма, запускаемого несколько раз в секунду. Поэтому отрезки группируются по секторам. При поиске пересечения сначала определяется сектор отрезка «точка — позиция робота», а затем операция обнаружения пересечения применяется только к отрезкам, находящимся в этом секторе. Это позволяет снизить вы-

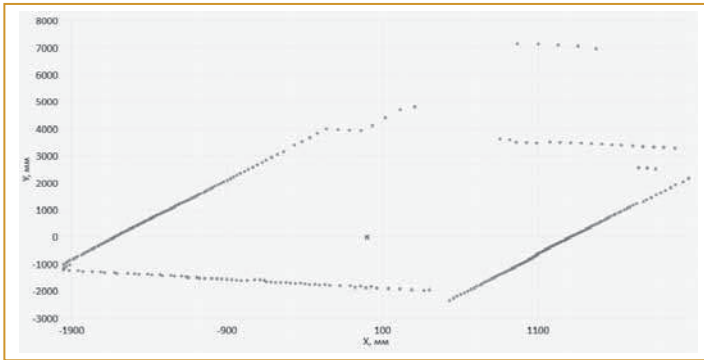


Рис. 9. Вид глобальной карты после добавления скана 1

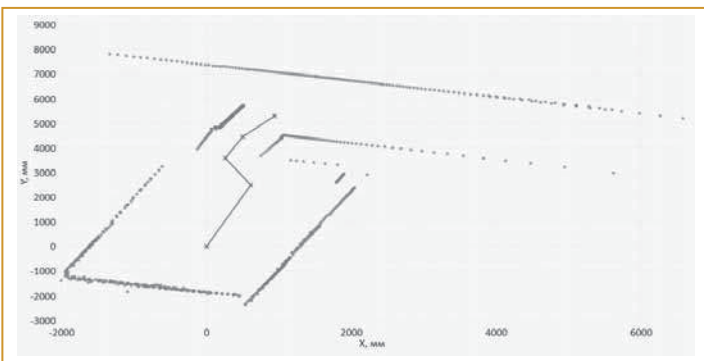


Рис. 10. Вид глобальной карты после обработки скана

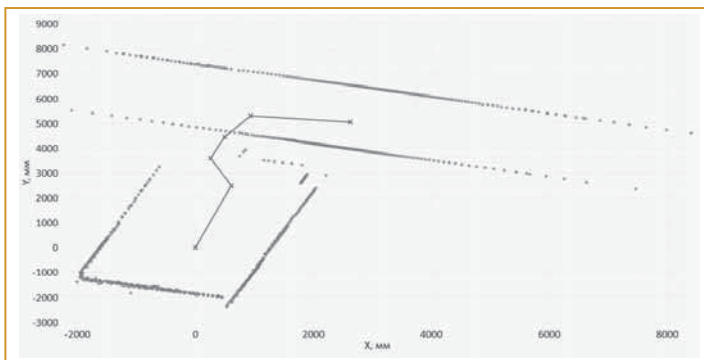


Рис. 11. Вид глобальной карты после обработки скана 6

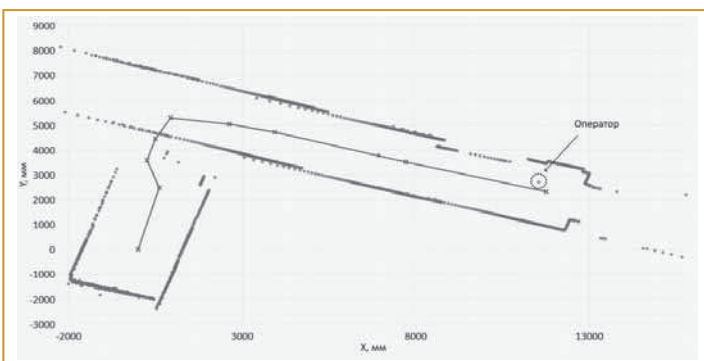


Рис. 12. Вид глобальной карты после обработки скана 9

числительную сложность алгоритма пропорционально числу секторов.

На рис. 5-VI видно, что, не смотря на внесенные изменения, на глобальной карте остались «следы» прошлого положения подвижного объекта. Эта ситуация неизбежно возникает при большом удалении двух последовательных позиций сканирования. С другой стороны, карта окрестности текущего положения робота всегда актуальна. Современные навигационные алгоритмы, например D^* (дэ-звезда), позволяют перестраивать маршрут при появлении дополнительной информации (http://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Алгоритм_D), то есть при приближении к «следу» динамического объекта карта обновится, а маршрут будет скорректирован с учетом новой информации. Таким образом, работа со значительно удаленными точками сканирования накладывает на оператора обязанность учесть это свойство алгоритма при определении ключевых точек маршрута.

С другой стороны, ситуация с удаленными точками сканирования довольно редка и используется в тестовых данных для намеренного усложнения условий работы алгоритма. При незначительном удалении последовательных позиций снятия сканов подобного эффекта не возникает.

На рис. 6 представлен итоговый вид глобальной карты. В сравнении с результатом работы базового алгоритма (рис. 2) на итоговой карте исчез «след» движения динамического объекта. Также в какой-то мере устранен эффект утолщения стен помещения, связанный с погрешностью определения позиции робота. В итоге, можно сделать вывод о том, что модифицированный NDT-алгоритм вполне работоспособен в условиях динамического окружения.

Еще одна важная характеристика, необходимая для верной оценки предложенного решения — это быстродействие алгоритма. На рис. 7 представлена диаграмма вычислительной сложности модификации NDT-алгоритма. Как видно из полученных значений, вычислительные затраты модифицированного NDT-алгоритма сопоставимы с затратами на обработку скана. Таким образом, общее быстродействие системы после модификации уменьшилось менее чем на порядок [12], что является приемлемым для использования в приложениях реального времени.

На основании результатов тестирования предложенной модификации базового NDT-алгоритма для учета динамики среды можно заключить, что основная задача — учет динамичности объектов окружения, решается достаточно эффективно. Кроме того, можно утверждать, что в этом случае ее объем вычислений увеличивается примерно в 2 раза. Это свидетельствует о том, что модификация алгоритма сохраняет способность обрабатывать несколько сканов в секунду.

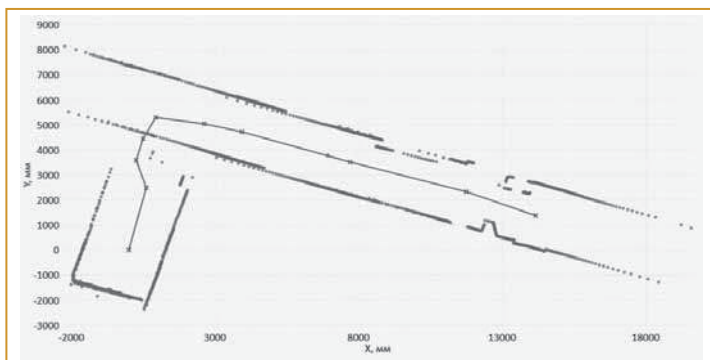


Рис. 13. Вид глобальной карты после обработки скана 10

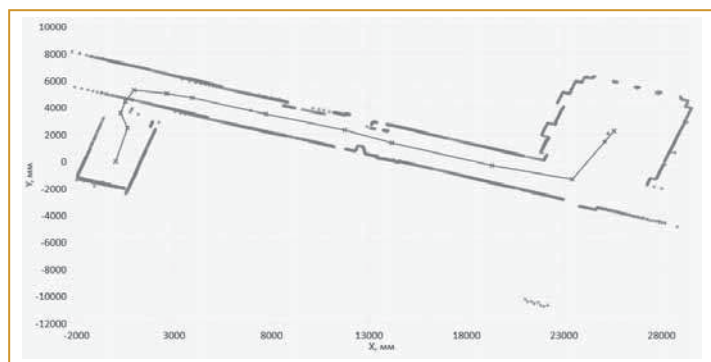


Рис. 14. Итоговый вид глобальной карты

Однако заметим, что тестирования на специально подготовленных данных недостаточно и для более тщательной проверки ее работоспособности следует выполнить проверку на основе данных, приближенных к реальной производственной ситуации.

Проверка решения на реальных данных

Используемое оборудование. Для проверки решения на реальных данных использовалась мобильная колесная платформа, оснащенная сканнером RPLidarA2. Для оценки данных одометрии использовались: девятиосевой модуль отслеживания движений MPU-9250 и данные с оптических инкрементных энкодеров AEDR-8710-102. Параметры качества измерений представлены в табл. 1.

Указанные выше погрешности измерений располагаются в допустимой области сходимости алгоритма [1]. Следовательно, предложенный для эксперимента комплект оборудования отвечает требованиям, необходимым для апробации предложенной модификации алгоритма на данных, представляющих реальную динамическую ситуацию.

Описание миссии. В рамках миссии мобильная платформа, управляемая с пульта, перемещалась в пределах нескольких комнат и коридора. Всего было сделано 13 различных сканов. В рамках миссии в окружении присутствовали динамические объекты: дверь в одну из комнат, изменившая свое положение между двумя сканами, и оператор, следовавший за мобильной платформой по ходу миссии.

В табл. 2 представлены данные одометрии для каждого из сканов. Ключевым результатом решения задачи локализации является восстановление параметров поворота и смещения робота между двумя соседними кадрами сканирования. Данные с датчиков, приведенные в табл. 2, используются в качестве первого приближения для определения фактических значений (табл. 3) в рамках решения оптимизационной задачи.

Учитывая параметры используемого сканнера и габариты помещений, в которых проводились испытания, эффективный радиус сканирования для модификации алгоритма был принят равным четырем метрам, а радиус области dR, в которой точки скана считаются соседними — 50 мм.

Обсуждение результатов проверки на реальных данных. В табл. 3 приведены результаты вычисления параметров при выравнивании кадров сканирования, а на рис. 8 представлена схема области испытаний. Табл. 4 предоставляет информацию о вычислительной сложности каждого цикла обработки очередного скана и фактическом времени работы алгоритма.

На рис. 9–13 представлен вид глобальной карты после обработки очередного скана. Сплошной линией, соединяющей символы «х», показана траектория движения роботизированной платформы.

На рис. 9 изображено состояние глобальной карты в начальный момент времени после обработки первого скана. Здесь видна начальная позиция мобильной платформы (отмечена знаком «х») и комната, в которой начинается SLAM-миссия.

На рис. 10 и 11 представлен вид глобальной карты до и после закрытия двери в начальную комнату. Как видно из снимков модификация, учитывающая динамику среды, отработала корректно.

На рис. 12 и 13 представлен вид глобальной карты при перемещении платформы по коридору через секционные двери. На рис. 12 рядом с последней позицией робота (слева сверху) видна точка, обозначающая положение оператора. На рис. 13 она отсутствует, так как оператор за время, прошедшее между сканами, вышел из зоны обнаружения.

На рис. 14 представлен итоговый вид глобальной карты. Общие очертания и форма траектории мобильного робота достаточно точно повторяют контуры зоны испытаний и фактическую траекторию движения. Сканы, на которых присутствовала динамика окружения, также обработаны корректно. Учитывая, что среднее время обработки скана составило около 100 мс, можно утверждать, что испытания разработанной системы в реальных условиях прошли успешно.

Заключение

В работе исследованы навигационные системы мобильных роботизированных платформ и алгоритмы навигации. Разработан эффективный алгоритм

*Карта - не территория.
Единственная польза от карты
зависит от схожести структуры
между эмпирическим миром и
картой...*

Альфред Коржибски

параллельно выполняемых локализаций и картографирования для изменяющегося окружения. Данный алгоритм можно использовать для организации движения мобильных роботов в динамической среде. Для расширения возможностей алгоритмов SLAM при работе в динамической среде предложена их модификация, заключающаяся в изъятии из глобальной карты тех точек, что оказались в области видимости датчиков робота и не перекрываются вновь обнаруженными объектами.

Для проверки качества работы модифицированного NDT-алгоритма проведена серия тестов. Тесты проводились как на специально смоделированных, так и на реальных данных.

По результатам численных экспериментов, проведенных на предложенных тестах, оказалось, что общие очертания и форма траектории мобильной платформы достаточно точно повторяют габариты зоны испытаний и фактическую траекторию движения. Сканы, на которых присутствовала динамика окружения, также обработаны корректно. Учитывая, что среднее время обработки скана составило около 100 мс, можно утверждать, что система эффективно работает в условиях реального времени, что позволяет процессору обрабатывать данные из облака точек лидара со скоростью достаточной для плавного движения устройства.

Модифицированный NDT-алгоритм решения задачи локализации и картографирования позволит сократить требуемые вычислительные ресурсы, а также построить прогнозный алгоритм управления и, как следствие, обеспечит более «уверенное» движение робота в динамической среде.

Список литературы

1. Герасимов В.Н. Система управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

- Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб. 2013. С. 94-102.
2. Cadena C. [и др.]. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age // IEEE Transactions on Robotics. 2016. № 6 (32). С. 1309-1332.
 3. Трубин П.П. Предиктивная модель окружения, как результат SLAM-миссии // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: Тр. IX междунар. научно-техн. Internet конф. молодых ученых. Омск: ОмГТУ, 2019. С. 78-82
 4. Rusinkiewicz, S. Efficient Variants of the ICP Algorithm / S. Rusinkiewicz, M. Levoy // 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on. 2001. P. 145-152.
 5. Chen, Y. Object modelling by registration of multiple range images / Y. Chen, G. Medioni // Image and Vision Computing. 1992. Vol. 10(3). P. 145-155.
 6. Besl, P.J. A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, H.D. McKay // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions. 1992. P. 239-256.
 7. Lu, F. Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans / F. Lu, E. Milios // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1997. Vol. 18(3). P. 249-275.
 8. Kohlbrecher, S. A. Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation / S. Kohlbrecher, O. von Stryk, J. Meyer, U. Klingauf. // Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on. 2011. P. 155-160.
 9. Grisetti, G. Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters / G. Grisetti, C. Stachniss, W. Burgard // Robotics, IEEE Transactions on. 2007. Vol. 23(1). P. 34-46.
 10. Biber, P. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching/P. Biber, W. Strasser//Proceedings of Intelligent Robots and Systems 2003, IEEE/RSJ International Conference. 2003. Vol. 3. P. 2743-2748.
 11. Трубин П.П. Математическая модель NDT SLAM // Тр. VII междунар. научно-технич. Internet конф. молодых ученых. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2017. С.146-149.
 12. Трубин П.П. Апробация реализации алгоритма NDT-Slam / П.П.Трубин // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. 4-й всерос. научн.-техн. конф. с междунар. участием. Курск: ЗАО «Университетская книга». 2019. С. 266-269
 13. Трубин П.П. Метод обновления карты в рамках SLAM-миссии в динамической среде // Информационный бюллетень Омского научно-образовательного центра ОмГТУ и ИМ СО РАН в области математики и информатики. Омск: ОмГТУ. 2019. Т. 3. №1. С. 219-221

Трубин Павел Петрович – аспирант,

Ибатуллин Альберт Амирович – канд. техн. наук, доцент,

Хомченко Василий Герасимович – д-р техн. наук, проф., проф.,

Гебель Елена Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация и робототехника»

Омского государственного технического университета.

E-mail: prizrak_0@mail.ru ibatullin77@yandex.ru v_khomchenko@mail.ru gebel_es@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2020

Принята в печать 1.07.2020