

# МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ С ЛАЗЕРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ДАЛЬНОМЕРА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

## METHOD FOR COMPLEX REGISTRATION OF MEASUREMENT DATA FROM LASER SCANNER DURING MOBILE ROBOT MOVEMENT

*S. Luksha*

*Summary.* This paper is about development, realization and test of method for complex registration measurement data received from laser scanner sensor, which attached to mobile robot. Received information about displacement can be used for onboard measurement system as additional source of navigation data.

*Keywords:* onboard measurement system, laser scanner, mobile robot, point cloud registration.

*Лукша Сергей Сергеевич*

*Аспирант, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет»  
lukshasergei@yandex.ru*

*Аннотация.* Рассматривается разработка, реализация и испытание метода сопоставления измерительной информации, полученной в ходе сканирования пространства функционирования мобильного робототехнического комплекса. Предлагается использовать полученные данные при сопоставлении как источник навигационных данных для мобильного робототехнического комплекса.

*Ключевые слова:* информационно-измерительная система, лазерные сканеры, мобильный робототехнический комплекс, сопоставление трёхмерных сцен.

## Введение

**А**нализ измерительной информации с бортовой информационно-измерительной системы (БИИС) мобильного робототехнического комплекса (МРТК) играет основополагающую роль для обеспечения эффективного функционирования МРТК в его пространстве функционирования (ПФ). Среди основных задач, решаемых при функционировании МРТК в ПФ являются навигация, оценка параметров препятствий и траекторное управление. В зависимости от условий функционирования качество оценки параметров перемещения может варьироваться, поэтому получение оценки от различных типов датчиков также может повысить эффективность функционирования.

В настоящей работе предлагается рассмотреть вопрос анализа измерительной информации с лазерного сканирующего дальномера (ЛСД), способного формировать трёхмерные сцены ПФ для оценки параметров перемещения МРТК в ходе сканирования, а также процесс формирования общей трёхмерной сцены ПФ на основе сопоставления частных сцен.

*Цель работы* — разработка комплексного алгоритма сопоставления частных трёхмерных сцен для анализа перемещения МРТК в ПФ и формирования общей трёхмерной сцены ПФ.

## Теоретическая часть

В робототехнике сформировалось направление, образующее группу методов и получившее название SLAM (от англ. Simultaneous Localisation and Mapping — Одновременная локализация и картографирование). Задача методов: сформировать представление о ПФ при его исследовании. В большинстве случаев предполагается, что МРТК попадает в ПФ впервые и ему требуется осуществлять как локализацию — то есть определение местоположения с последующим перемещением в заданную позицию, так и картографирование, то есть формирование интегрального представления о ПФ. Зачастую в методах определения местоположения используется информация об относительном смещении объектов ПФ в ходе движения мобильной робототехнической платформы.

Первыми работами в этом направлении можно считать [1], [2], описывающие возможности использования объекты окружающего пространства как опорных точек при навигации. Позже в работах [3], [4], [5] была поставлена задача корреляции положения объектов, зарегистрированных сенсорной системой с разных местоположений мобильного робота. В работах [6], [7], были рассмотрены вопросы оптимизации вычислений при использовании алгоритмов локализации и картографирования.

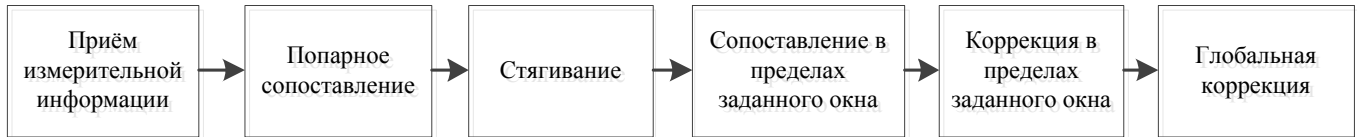


Рис. 1. Общая структура алгоритма сопоставления

Одним из наиболее распространённых алгоритмов для сопоставления является Итеративный алгоритм ближайших точек, предложенный в работах [8],[10] и более детально представленный в работе [9] с описанием различных вариантов. Несмотря на использование различных модификаций, алгоритм ICP, для стабильной работы системы сопоставления используются начальные приближения с других типов датчиков. Поэтому предлагается рассмотреть комплексный алгоритм, который способен осуществлять достоверную оценку перемещения МРТК в ПФ без использования корректирующей информации от других типов датчиков.

Одними из наиболее популярных сенсоров сканирующего типа в робототехнике являются ЛСД высокого разрешения (ЛСДВР) Velodyne. Серьёзным недостатком этого датчика является неравномерность горизонтального и вертикального разрешения, что сказывается на сложности сопоставления данных классическим алгоритмом. Делая акцент на этих особенностях, в настоящей работе предлагается алгоритм, позволяющий компенсировать влияние факторов неравномерности углового разрешения и деформацию пространственного представления при использовании данных, полученных в ходе перемещения МРТК с ЛСДВР Velodyne и аналогичных по конструкции.

Пусть  $P$  — множество измерений, полученных за определённый период времени в ходе перемещения МРТК. В множество  $P$  входят подмножества  $P = \{P_1, \dots, P_{N_p}\}$ , каждое из которых сформировано из измерений, полученных за один полный оборот ЛСДВР вокруг вертикальной оси. Каждое из подмножеств  $P_i, i=1, \dots, N_p$  будем называть частной трёхмерной сценой,  $N_p$  — количество трёхмерных сцен, входящих в полученный массив измерений. Каждая из трёхмерных сцен в свою очередь состоит из множества пространственных положений измерений или точек

$$P_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix}.$$

Каждая из сформированных трёхмерных сцен имеет определённую структуру в соответствии с типом

сканирующего устройства. Так, для ЛСДВР Velodyne структуру можно представить в виде матрицы, где каждая строка соответствует лазерному сканирующему модулю (ЛСМ), а каждый столбец соответствует угловому положению сканирующей головки. При числе ЛСМ в устройстве  $l_{sn}$ , порядковом номере углового положения сканирующей головки  $hda$  и номере ЛСМ  $l$ , порядковый номер точки в массиве измерений  $k$  будет определяться как

$$k = hda \cdot l_{sn} + l$$

Основной задачей алгоритма сопоставления для двух трёхмерных сцен  $P_b$  и  $P_c$  является поиск такого вращения  $R$  и перемещения  $\tau$ , при которых справедливо выражение

$$P_c = RP_b + \tau$$

Поскольку при сканировании с разных пространственных положений области отражения лазерного луча не совпадают, то выражение можно определить как минимизацию функции вида

$$E(R, \tau) = \sum_i \|p_{c,i} - (Rp_{b,i} + \tau)\|^2$$

где  $p_{b,i}$  и  $p_{c,i}$  — соответствующие точки из трёхмерных сцен  $P_b$  и  $P_c$ . Понятие соответствующих точек подразумевает, что для области пространства, в котором произошло отражение лазерного электромагнитного излучения от поверхности с получением исходных данных

$$\{r_{b_i}, a_{b_i}, \varphi_{b_i}, \psi_{b_i}, \chi_{b_i}, t_{b_i}\}$$

и далее точки  $p_{b,i}$  является наиболее близким областью пространства, в котором произошло отражение лазерного электромагнитного излучения с получением исходных данных

$$\{r_{c_i}, a_{c_i}, \varphi_{c_i}, \psi_{c_i}, \chi_{c_i}, t_{c_i}\}$$

и далее точки  $p_{c,i}$ .

Задача алгоритма сопоставления заключается в последовательном вычислении пространственного положения мобильной платформы в каждый момент вре-

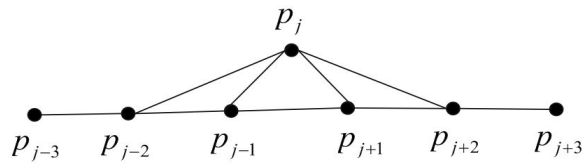


Рис. 2. Схематическое изображение точек, полученных на основе измерений с одного ЛСМ.

мени получения измерительной информации. Общая структура алгоритма представлена на рисунке 1.

Рассмотрим алгоритм выделения особых точек. Пусть  $P_{b, l_i}$  подмножество трёхмерной сцены  $P_b$ , включающее измерения, полученные с помощью одного ЛСМ,

$$P_{b, l_i} = \{p_1, \dots, p_j, \dots, p_{N_{b, l_i}}\},$$

где  $N_{b, l_i}$  — количество измерений, полученное ЛСМ, причём

$$N_{b, l_i} = \frac{N_{P_b}}{l_{sn}}$$

Выберем исследуемую точку  $p_j$ , такую что  $p_j \in P_{b, l_i}$ ,  $j \neq 1$  и  $j \neq N_{b, l_i}$ . Рассмотрим две соседние точки,  $p_{j-1}$  и  $p_{j+1}$ . Используя алгоритм определения важности узла [107] определим, насколько исследуемая точка будет эффективна при поиске соответствующей ей. Важность точки определим согласно выражению

$$I_j = \left\| p_j - p_{j-1} \right\|^2 + \left\| p_{j+1} - p_j \right\|^2 - \left\| p_{j+1} - p_{j-1} \right\|^2$$

На рисунке 2 схематически представлена окрестность исследуемой точки  $p_j$ , которая обладает наивысшей важностью среди рассматриваемых, поскольку

$$\left\| p_j - p_{j-1} \right\|^2 + \left\| p_{j+1} - p_j \right\|^2 > \left\| p_{j+1} - p_{j-1} \right\|^2.$$

Точки  $p_{j-1}$  и  $p_{j+1}$  также обладают высокой важностью, а точки  $p_{j-2}$  и  $p_{j+2}$  обладают низкой важностью, поскольку

$$\left\| p_{j-2} - p_{j-3} \right\|^2 + \left\| p_{j-1} - p_{j-2} \right\|^2 \approx \left\| p_{j-1} - p_{j-3} \right\|^2$$

и  $I_{j-2} \approx 0$ , а также аналогично

$$\left\| p_{j+3} - p_{j+2} \right\|^2 + \left\| p_{j+2} - p_{j+1} \right\|^2 \approx \left\| p_{j+3} - p_{j+1} \right\|^2$$

и  $I_{j+2} \approx 0$ .

Важной особенностью предлагаемого алгоритма сопоставления является его оценка на предмет правдоподобия с учётом текущих параметров движения МРТК.

Предлагается ввести динамический порог по расстоянию среди найденных соответствий

$$d_{tr} = d_{min} + \alpha_1 \bar{d} \cdot \exp(\alpha_2 i_{iter})$$

где  $d_{min}$  — минимальное значение порогового расстояния,  $\bar{d}$  — среднее расстояние между соответствующими точками при последней итерации сопоставления,  $i_{iter}$  — номер текущей итерации,  $\alpha_1$  — коэффициент пропорциональности, определяющий превышение порога над фактическими значениями расстояния между соответствующими точками,  $\alpha_2$  — коэффициент, определяющий скорость уменьшения расстояния в зависимости от итерации,  $\alpha_2 < 0$ .

Из полученных и принятых соответствий формируется множества точек

$$\hat{P}_b = \{\hat{p}_{b,1}, \dots, \hat{p}_{b, N_{cor}}\} \text{ и } \hat{P}_c = \{\hat{p}_{c,1}, \dots, \hat{p}_{c, N_{cor}}\}$$

где  $N_{cor}$  — количество найденных и принятых соответствий и для каждой точки  $\hat{p}_{b,i}$  точка  $\hat{p}_{c,i}$  является соответствующей. В предлагаемом алгоритме используется метод оценки трансформации, основанном на сингулярном разложении [9]. Имея множества соответствующих точек определим центроиды для двух сканов среди найденных соответствий. Центроиды  $M_b$ ,  $M_c$  для множеств  $\hat{P}_b$ ,  $\hat{P}_c$  определяться как

$$M_b = \frac{1}{N_{cor}} \sum_{i=1}^{N_{cor}} \hat{p}_{b,i} \quad M_c = \frac{1}{N_{cor}} \sum_{i=1}^{N_{cor}} \hat{p}_{c,i}$$

Несмещённые множества точек определяются как

$$P'_b = \hat{P}_b - M_b \quad P'_c = \hat{P}_c - M_c$$

при этом  $P'_b = \{p'_{b,1}, \dots, p'_{b, N_b}\}$ ,  $P'_c = \{p'_{c,1}, \dots, p'_{c, N_c}\}$ . Сингулярное разложение корреляционной матрицы

$$H = \sum_i p'_b p'^T_{c,i}$$

в виде  $H = U \Lambda V^T$ , где  $U$ ,  $V$  — ортонормальные матрицы и  $\Lambda$  — диагональная матрица с положительными элементами позволяет определить вращение как

$$R = VU^T$$

Для повышения эффективности алгоритма сопоставления используются комбинации следующих стратегий:

1. Парное сопоставление — каждое последующая полученная сцена сопоставляется с предыдущей. Стратегия используется для грубого приближения и первоначального формирования представления о ПФ.

2. Стягивание — каждое последующая полученная сцена сопоставляется с базовой из текущей группы, которая используется до тех пор, пока сохраняется эффективность сопоставления. При снижении эффективности роль базовой сцены переходит к последней успешно сопоставленной;

3. Сопоставление в пределах заданного окна — осуществляется для повышения качества сопоставления за счёт использования набора сцен в пределах окна;

4. Коррекция в пределах заданного окна — коррекция параметров сопоставлений в соответствии с используемым критерием в пределах заданного окна;

5. Глобальная коррекция — коррекция параметров сопоставлений в соответствии с используемым критерием на всём рассматриваемом наборе сцен.

Особое внимание уделено сопоставлению частных сцен при движении МРТК. Вводится понятие скорости соответствия, под которым подразумевается значение скорости МРТК, определённое на основе найденного сопоставления.

Для найденных множеств соответствующих точек  $P_c$  и  $P_b$  определим два множества индексов

$$I_{base} = \{idx_{base,1}, \dots, idx_{base,N_{cor}}\}$$

и

$$I_{cor} = \{idx_{cor,1}, \dots, idx_{cor,N_{cor}}\},$$

содержащие индексы пар соответствий в множестве  $P_b$  (для  $I_{base}$ ) и  $P_c$  (для  $I_{cor}$ ). Кроме этого, введём множество моментов времени, в которые была получена измерительная информация

$$T = \{t_1, \dots, t_{N_T}\},$$

где  $N_T$  — общее количество пакетов измерительной информации формата  $\{r, a, \chi, \psi, t\}$  в множестве  $\mathbf{P}$ . Для каждого множества соответствующих точек определим два множества моментов времени

$$T_{base} = \{t_{base,1}, \dots, t_{base,N_{cor}}\}$$

и

$$T_{cor} = \{t_{cor,1}, \dots, t_{cor,N_{cor}}\},$$

каждый элемент которых определяет момент времени, в который было получено измерение соответствующей точки, для множеств  $P_b$  и  $P_c$  соответственно. Тогда линейная скорость соответствий будет определяться как

$$v_{tx,i} = \frac{P_{c,idx_{cor,i},x} - P_{b,idx_{base,i},x}}{t_{cor,i} - t_{base,i}}$$

$$v_{ty,i} = \frac{P_{c,idx_{cor,i},y} - P_{b,idx_{base,i},y}}{t_{cor,i} - t_{base,i}}$$

$$v_{tz,i} = \frac{P_{c,idx_{cor,i},z} - P_{b,idx_{base,i},z}}{t_{cor,i} - t_{base,i}}$$

где  $v_{tx,i}, v_{ty,i}, v_{tz,i}$  — линейная скорость соответствий по каждому из параметров для  $i$ -ого соответствия,  $P_{c,idx_{cor,i},x}$  — значение координаты  $x$  для соответствующей точки с индексом  $idx_{cor,i}$  из множества  $P_c$ ,  $P_{b,idx_{base,i},x}$  — значение координаты  $x$  для соответствующей точки с индексом  $idx_{base,i}$  из множества  $P_b$ .

Вводится понятие ограничения скорости соответствия в двух категориях: ограничения первой категории связаны с физическими возможностями МРТК и её кинематической схемой; ограничения второй категории связаны с текущими параметрами движения МРТК и невозможностью мгновенно изменить скорость движения. Коррекция комплексным алгоритмом сопоставления осуществляется с использованием ограничений скоростей соответствия.

### Экспериментальная часть

Проведены экспериментальные исследования комплексного алгоритма сопоставления частных трёхмерных сцен. Эксперимент с использованием смоделированных данных проводился в программном модуле MATLAB. В качестве смоделированных данных использовались трёхмерные сцены, полученных моделью ЛСДВР Velodyne HDL-32E. Сбор данных в ходе движения МРТК приводит к нарушению целостности трёхмерной сцены, что выражается в виде геометрических искажений. Использование алгоритма на основе скорости соответствий позволило компенсировать влияния равноускоренного движения на формируемую трёхмерную сцену.

Таблица 1. Результаты эксперимента по перемещению МРТК по замкнутой траектории на территории кампуса РГРТУ

№	Длина пройденного пути, м	Расстояние между стартовой и финишной точкой траектории после сопоставления, м		
		Базовый алгоритм	Комплексный алгоритм с коррекцией в пределах заданного окна	Комплексный алгоритм с глобальной коррекцией
1	118,5	3,34	0,24	0,12
2	194,4	8,08	0,45	0,06
3	482,15	28,03	9,22	1,26

Анализ показал, что для предложенного алгоритма показатель среднеквадратического отклонения составил  $\sigma_{cs} = 1,16$ , в то время как для классического алгоритма он составил  $\sigma_c = 5,78$ , что почти в 5 раз выше.

Для экспериментов на реальных данных был произведён сбор измерительной информации с использованием ЛСДВР Velodyne HDL-32E, установленного на МРТК на базе Газель «Бизнес» вместе с системой ГНСС Garmin 18x LVC. Перемещение осуществлялось по траекториям с совпадающими точками старта и финиша. Для оценки предлагается использовать полученные значения расстояния между оцененными положениями старта и финиша в качестве критерия эффективности предложенного комплексного алгоритма сопоставления. В табл. 1 представлены результаты эксперимента на реальных данных, полученных в ходе перемещения МРТК, пилотируемой оператором по территории Рязанского радиотехнического университета (РГРТУ) и показатели расстояния между начальной и конечной точкой маршрута. Суммарная ошибка достижения МРТК точки старта составляет не более 0,1 м.

В результате экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- ♦ разработанный комплексный алгоритм сопоставления позволяет осуществлять оценку перемещения МРТК с ошибкой не более 0,02 м на 1 м перемещения в условиях городской местности, что в 8–10 эффективнее, чем базовый алгоритм.
- ♦ оценка скорости МРТК, проведённая на основе скоростей соответствия в рамках комплексного алгоритма сопоставления позволяет снизить геометрические искажения при движении МРТК до 3 раз эффективнее, чем при использовании базового алгоритма.

Помимо оценки перемещения в ходе эксперимента была получена трёхмерная сцена ПФ МРТК на базе совмещённых частных сцен.

## ВЫВОДЫ

Разработанный алгоритм позволил получить дополнительный источник навигационной информации для МРТК и может быть использован в условиях низкой эффективности других навигационных систем. Кроме этого, точное сопоставление трёхмерных сцен для оценки параметров объектов ПФ требует анализа объектов ПФ частных сцен, что и было проведено в рамках разработанного алгоритма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. Smith and P. Cheesman. On the representation of spatial uncertainty. *Int. J. Robotics Research*, 5(4):56–68, 1987.
2. H.F. Durrant-Whyte. Uncertain geometry in robotics. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 4(1):23–31, 1988
3. H. Durrant-Whyte, D. Rye, and E. Nebot. Localisation of automatic guided vehicles. In G. Giralt and G. Hirzinger, editors, *Robotics Research: The 7th International Symposium (ISRR'95)*, pages 613–625. Springer Verlag, 1996.
4. M. Csorba. Simultaneous Localisation and Map Building. PhD thesis, University of Oxford, 1997
5. M. Csorba and H. F. Durrant-Whyte. A new approach to simultaneous localisation and map building. In *Proceedings of SPIE Aerosense, Orlando, 1996*
6. J. Hollerbach and D. Koditschek (Editors). *Robotics Research, The Ninth International Symposium (ISRR'99)*. Springer-Verlag, 2000.
7. S. Thrun, D. Fox, and W. Burgard. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots. *Machine Learning*, 31(1):29–53, 1998
8. Chen, Y. and Medioni, G. «Object Modeling by Registration of Multiple Range Images,» *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1991.
9. S. Rusinkiewicz, M. Levoy. Efficient Variants of the ICP Algorithm, *3-D Digital Imaging and Modeling*, 145–152
10. Besl, P. and McKay, N. «A Method for Registration of 3-D Shapes,» *Trans. PAMI*, Vol. 14, No. 2, 1992.