

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 510.5; 004.93

А. И. Абрамов, кандидат технических наук
 И. В. Абрамов, доктор технических наук, профессор
 Т. А. Мазитов, аспирант
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ICP ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ
 ДЛЯ УСКОРЕНИЯ СОВМЕЩЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ОБЛАКОВ ТОЧЕК

В статье представлено описание алгоритма ICP и его распространенных вариаций. При решении задачи совмещения двумерных облаков точек показана эффективность использования коэффициента усиления для ускорения ICP-алгоритма. Расчет коэффициента по выведенной формуле позволяет существенно повысить скорость сходимости алгоритма. Проведен ряд экспериментов, доказывающих целесообразность применения и эффективность предложенного усовершенствованного алгоритма ICP.

Ключевые слова: итеративный алгоритм ближайшей точки, облака точек, коэффициент усиления, лазерная сканирующая система.

Введение

Существует большое количество задач, в которых исследуемые модели представлены в виде массивов точек в пространстве. Первые работы, посвященные взаимному ориентированию облаков точек, были разработаны в начале девяностых годов зарубежными учеными – Y. Chen, G. Medioni (1992) [1], P. J. Besl, N. D. McKay (1992) [2]. Предложенный ими метод получил название итеративного алгоритма ближайших точек, или ICP-алгоритма (от англ. *Iterative Closest Point*). ICP представляет собой итеративный алгоритм, выполняющий преобразования (смещение, вращение), необходимые для сведения к минимуму расстояния между точками из двух дискретных точечных моделей.

Базовый алгоритм хорошо работает только в идеальных случаях. Это привело к сотням вариаций (более 600, опубликованных за последние 20 лет по данным IEEE Xplore) оригинального алгоритма, результаты работы которых были продемонстрированы

в различных сферах от стоматологии [3] до построения трехмерных карт.

Наличие такого большого числа работ говорит не только об универсальности алгоритма, но и о сложности выбора подходящего варианта для конкретных условий. Несмотря на последующие совершенствования, он до сих пор сохраняет свою исходную идею практически неизменной. В статье представлен обзор основных этапов алгоритма и их возможные вариации. Данная работа посвящена совершенствованию ICP-алгоритма в задаче построения двумерных карт. Исследование направлено на ускорение работы алгоритма и его адаптацию для применения в среде с большим количеством помех.

Описание алгоритма

ICP представляет собой итеративный алгоритм выполнения нескольких последовательных операций, целью которых является совмещение двух облаков точек. Обобщенная схема алгоритма представлена на рис. 1.

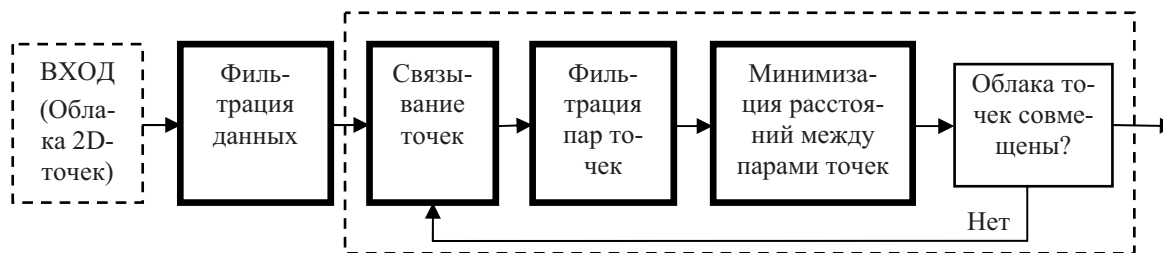


Рис. 1. Схема алгоритма

Входами алгоритма являются исследуемые облака точек, а выходом – матрицы смещения и вращения. Для каждого шага существуют несколько стратегий, и каждая стратегия требует специфических параметров, зависящих от исследуемых данных. Исходя из различных вариаций алгоритма, можно выделить следующие основные этапы:

1. Выбор точек, используемых для решения:

- использование всех точек;
- равномерные выборки;
- случайные выборки;
- поиск особых точек.

Данные стратегии выбора точек могут быть применены как для обоих облаков исследуемых точек, так и для одного.

2. Метрика сопоставления:

– Найти ближайшую точку из предыдущего для каждого элемента текущего облака [4].

– Найти пересечение нормали к поверхности текущего облака из исследуемой точки к поверхности предыдущего облака, образованной ее точками [5].

– Найти пересечение луча, идущего от центра лазерно-сканирующей системы и проходящего через исследуемую точку, с поверхностью предыдущего облака, образованной ее точками [6].

Существуют и другие метрики, однако их всех можно разделить на два типа: точка к точке и точка к поверхности. Метрики первого типа из-за дискретности данных имеют большую ошибку при сходимости алгоритма, в то же время для второго типа характерна большая вычислительная сложность. Данный этап занимает значительный объем времени, но при использовании определенных структур данных (таких, как $k-d$ -деревья) может быть эффективно ускорен.

3. Вес пар:

– одинаковый вес для всех пар точек;

– малый вес пар с большим расстоянием и больший вес пар с малым расстоянием. Наиболее эффективные методики определения весов описаны в работах [7] – EM-ICP-алгоритм и [8] – алгоритм Softassign.

Однако согласно работе [9] эффект взвешивания по скорости сходимости является небольшим и весьма зависимым от данных.

4. Отбрасывание пар:

– отбрасывание пар больше заданного значения;

– отбрасывание $N\%$ наихудших пар согласно выбранной метрике;

– отбрасывание пар, расстояние которых больше n от среднего расстояния между точками;

– отбрасывание пар, которые не согласуются с соседними парами. Подробно метод описан в [10];

– отбрасывание пар, содержащих граничные точки [11].

5. Минимизация среднеквадратической ошибки

На данном этапе выполняется расчет матриц поворота и смещения на основе связей, установленных на предыдущих шагах. Для этого могут использоваться следующие методы:

– Метод, основанный на сингулярном разложении матриц – SVD (от англ. singular value decomposition) [12].

– Методы на основе кватернионов [13], [14].

– Метод на основе ортонормированной матрицы [15].

В результате анализа применимости перечисленных методов было выявлено, что наиболее стабильным для плоского набора данных является SVD-метод.

Расчет коэффициента усиления

Данное исследование направлено на поиск самой быстрой вариации ICP-алгоритма для сопоставления двумерных облаков точек. Результаты работы планируется использовать в системах навигации мобильных роботов на основе лидаров. Одним из этапов построения карт и расчета траектории движения робота является совмещение данных лидара. Поскольку мобильными объектами необходимо управлять в реальном времени, скорость работы является одним из важнейших параметров.

На рис. 2 представлены результаты эксперимента по совмещению облака точек, полученного с помощью лидара HOKUYO utm-30lx-ew и такого же облака, но повернутого на 20° и смещенного на 4 % от диаметра описывающей его окружности.

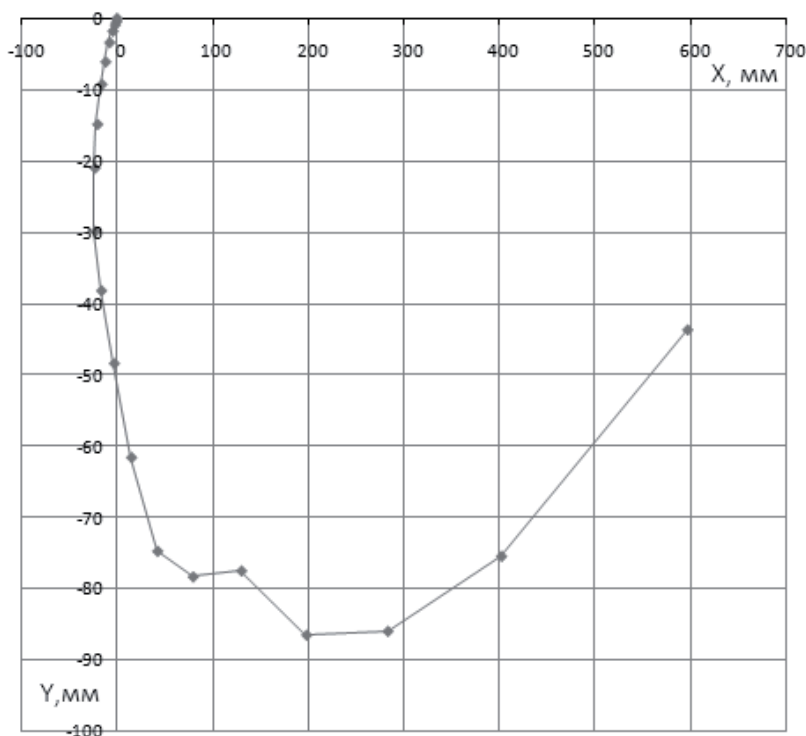


Рис. 2. Положения центра масс исследуемого облака точек относительно исходного облака на каждой итерации алгоритма

В экспериментах использовались подобные облака для того, чтобы адекватнее оценить скорость работы алгоритма и его точность – исследуемые облака идеально совмещаются при точном расчете матриц поворота и смещения.

На графике представлены положения центра масс исследуемого облака точек относительно исходного облака на каждой итерации алгоритма, от начального положения до полного совмещения, когда расстояние между центрами масс равно 0. Как видно из эксперимента, облака точек притягиваются по относительно плавной траектории, это обусловлено связями между парами точек: несколько точек исследуемого скана связаны с одной точкой исходного скана. Поэтому, так как направление смещения меняется между итерациями слабо, предлагается использовать коэффициенты усиления для матриц поворота и смещения, рассчитанных на последнем этапе алгоритма ИСР, по следующим формулам:

$$k_{\text{rot}} = 1 + \sigma^2,$$

$$k_{\text{tr}} = 1 + \sigma,$$

$$\sigma = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|X_k - Y_i\|}{\|M_X - M_Y\| + \delta},$$

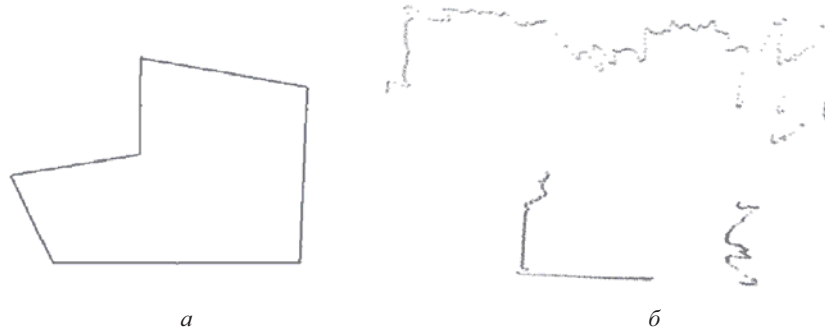


Рис. 3. Экспериментальные данные: *а* – контур плоской детали с непрерывными границами; *б* – данные лазерного сканирования комнаты

Массив точек на рис. 3, *а* описывает контур плоской детали, состоящей из 3414 точек, *б* – данные одного скана комнаты, полученные одноплоскостным лидаром (1081 точка). В эксперименте облака точек формировались с учетом поворота и смещения относительно начального облака:

- 1) 5°, 1 % от величины диаметра окружности, описывающей облако точек;
- 2) 10°, 2 % от величины диаметра окружности, описывающей облако точек;
- 3) 20°, 4 % от величины диаметра окружности, описывающей облако точек;
- 4) 40°, 8 % от величины диаметра окружности, описывающей облако точек.

Результаты представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4, *а* и *б* показано количество итераций, выполненных до сходимости алгоритма, для облака точек, представляющих контур детали и скан комна-

где k_{rot} – коэффициент усиления угла вращения; k_{tr} – коэффициент усиления вектора смещения; X_k – точка текущего скана; Y_i – ближайшая точка из предыдущего скана к точке X_k ; M_X – центр масс точек текущего скана; M_Y – центр масс точек-пар из предыдущего скана; δ – величина, характеризующая погрешность измерения.

Величина σ характеризует корректность пар при идеальных данных, когда погрешность измерения равна 0 и все пары установлены правильно, $\sigma = 0$ – два облака данных идеально совмещаются за 1 итерацию. При малых различиях между кадрами расстояние между центрами масс облаков связанных точек стремится к нулю, среднее значение расстояний между связанными точками (числитель) мало, но на порядки больше – знаменатель стремится к нулю, а σ – к бесконечности. Для получения сходимости в формулу введена величина δ , характеризующая погрешность измерения и ограничивающая рост коэффициента усиления.

Работа алгоритма была протестирована на двух типах таборов данных, представленных на рис. 3.

Темным цветом отображено количество итераций с использованием коэффициента усиления, светлым – без использования коэффициента. Как видно из результатов эксперимента, использование предложенной модификации алгоритма значительно увеличивает скорость его сходимости. Малое увеличение скорости алгоритма для контура детали при малых трансформациях обусловлено большим количеством точек и их равномерным распределением по длине контура.

На рис. 5 представлены положения центра масс исследуемого облака точек относительно начального облака на каждой итерации алгоритма с использованием предложенного коэффициента усиления и без него, для данных лидара (20° поворота и смещение 4 %). Для алгоритма с коэффициентом усиления количество итераций меньше почти в два раза.

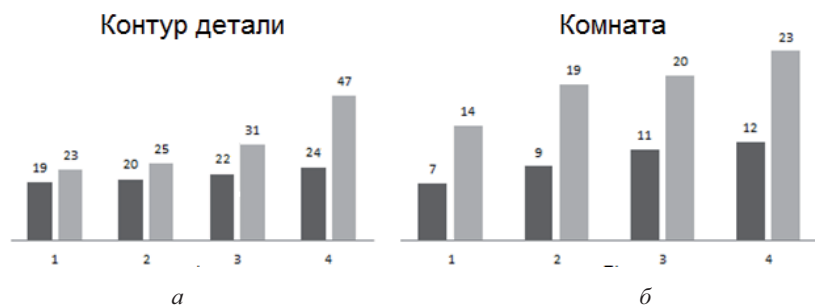


Рис. 4. Скорость сходимости ИСР-алгоритма (темным цветом количество итераций с использованием коэффициента усиления, светлым – без использования коэффициента)

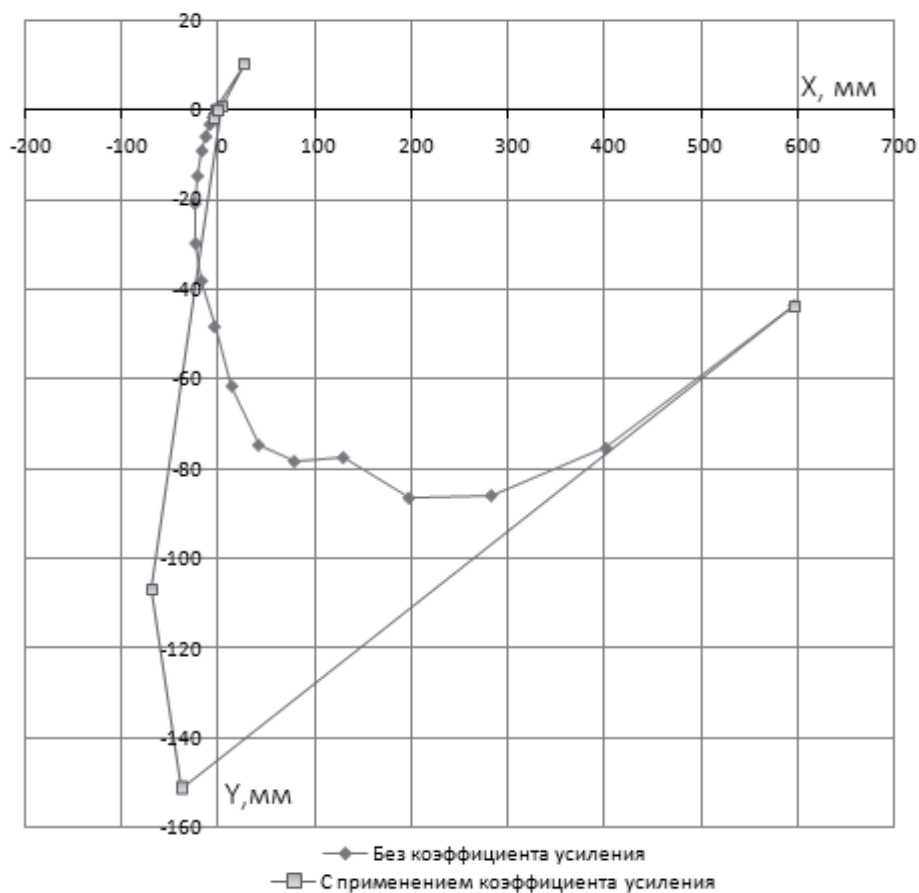


Рис. 5. Положения центра масс исследуемого облака точек относительно исходного облака на каждой итерации алгоритма

На рис. 6 представлены значения коэффициента усиления поворота и среднее расстояние между связанными точками на соответствующих итерациях при совмещении данных лидара: *a* – поворот 40°, смещение 8 %; *b* – поворот 20°, смещение 4 %; *в* – поворот 10°, смещение 2 %.

На графиках прослеживаются резкие скачки среднего отклонения в начале первой половины работы алгоритма. Перепады возникают при совмещении облаков с большим начальным различием, когда

связи устанавливаются «далеко» от правильных и коэффициент усиления большой. Наличие больших различий связано со скоростью движения мобильного объекта, быстродействием лидара и наличием динамической составляющей. Введенные в экспериментах верхние пределы коэффициентов усиления (для угла вращения – 15, для смещения – 6) представляют собой комплексные переменные, уточняемые для конкретных технических систем.

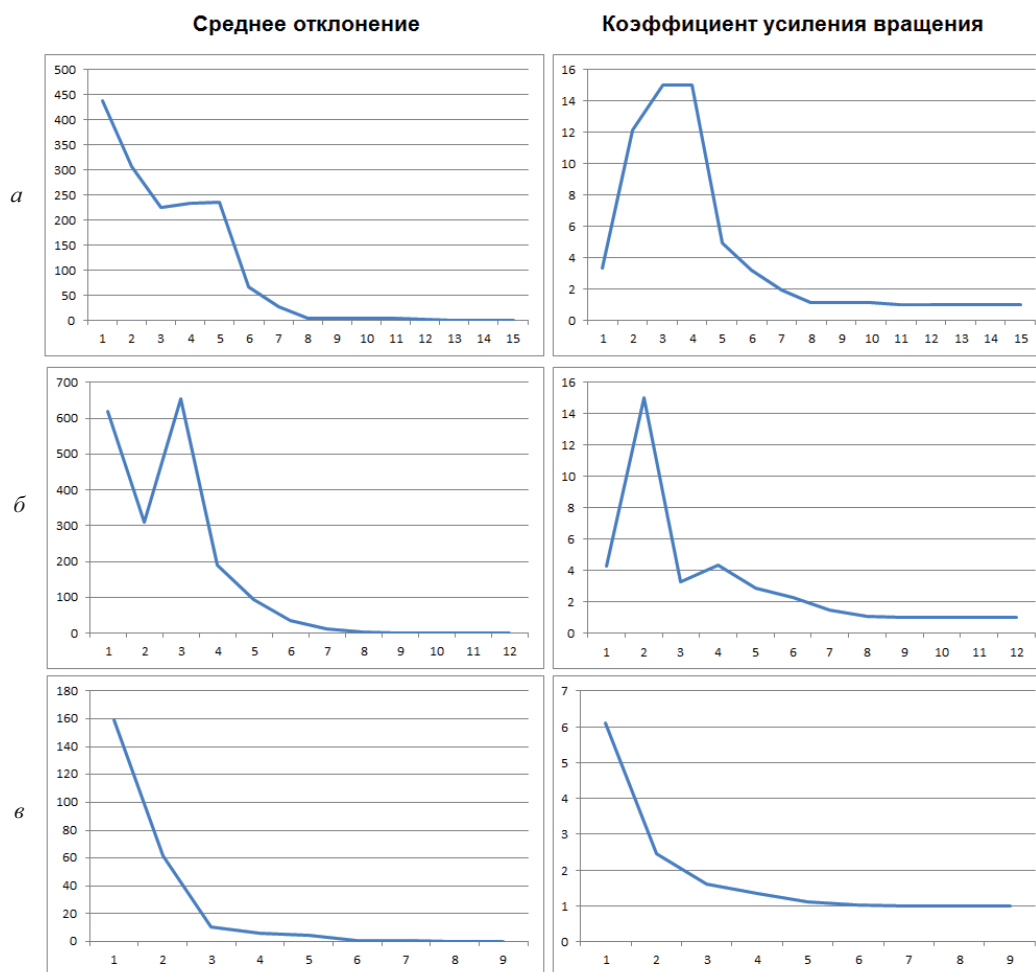


Рис. 6. Значение среднего отклонения и коэффициента усиления вращения на итерациях алгоритма

Заключение

В статье представлено описание алгоритма ICP и его распространенных вариаций. Использование коэффициента усиления, рассчитанного по разработанной формуле для ускорения ICP-алгоритма в задаче сопоставления кадров лидара, позволило существенно повысить скорость сходимости алгоритма.

Алгоритм работает значительно быстрее с неравномерно распределенными в пространстве данными, такими как облака точек, полученные в слабо детерминированных сценах с помощью сканирующих систем. Для таких данных скорость работы алгоритма повышается примерно в два раза.

Библиографические ссылки

1. Chen Y., Medioni G. Object modelling by registration of multiple range images // Image and vision computing. – 1992. – Т. 10. – № 3. – С. 145–155.
2. Besl P. J., McKay N. D. Method for registration of 3-D shapes // Robotics-DL tentative. – International Society for Optics and Photonics, 1992. – С. 586–606
3. Roche S. G. X. P. A. Rigid Point-Surface Registration using Oriented Points and an EM Variant of ICP for Computer Guided Oral Implantology. – 2001.
4. Besl P. J., McKay N. D. Method for registration of 3-D shapes // Robotics-DL tentative. – International Society for Optics and Photonics, 1992. – С. 586–606.
5. Chen Y., Medioni G. Object modelling by registration of multiple range images // Image and vision computing. – 1992. – Т. 10. – № 3. – С. 145–155.
6. Blais G., Levine M. D. Registering multiview range data to create 3D computer objects // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 1995. – Т. 17. – № 8. – С. 820–824.
7. Granger S., Pennec X. Multi-scale EM-ICP: A fast and robust approach for surface registration // Computer Vision–ECCV 2002. – 2006. – С. 69–73.
8. Gold S. et al. New algorithms for 2D and 3D point matching: Pose estimation and correspondence // Pattern recognition. – 1998. – Т. 31. – № 8. – С. 1019–1031.
9. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm // 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on. – IEEE, 2001. – С. 145–152.
10. Dorai C. et al. Registration and integration of multiple object views for 3D model construction // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 1998. – Т. 20. – № 1. – С. 83–89.
11. Turk G., Levoy M. Zippered polygon meshes from range images // Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – ACM, 1994. – С. 311–318.
12. Arun K. S., Huang T. S., Blostein S. D. Least-squares fitting of two 3-D point sets // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 1987. – № 5. – С. 698–700.

13. *Horn B. K. P.* Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions // JOSA A. – 1987. – Т. 4. – № 4. – С. 629–642.

14. *Walker M. W., Shao L., Volz R. A.* Estimating 3-D location parameters using dual number quaternions // CVGIP: image understanding. – 1991. – Т. 54. – № 3. – С. 358–367.

15. *Horn B. K. P., Hilden H. M., Negahdaripour S.* Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices // JOSA A. – 1988. – Т. 5. – № 7. – С. 1127–1135.

A. I. Abramov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

I. V. Abramov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

T. A. Mazitov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Modification of ICP algorithm by introducing the gain to speed up the alignment of two-dimensional point clouds

The article provides an overview of ICP algorithm and its common variants. It is proposed to use the gain to accelerate ICP-algorithm in the problem of comparison of two-dimensional point clouds. Calculation of the gain is presented. The algorithm obtained was experimentally tested to prove the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: iterative closest point algorithm, point cloud, gain, laser scanning system.

Получено: 20.04.16