УДК 004.932.2

АЛГОРИТМ СОВМЕЩЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДАМИ КОНТУРНОГО АНАЛИЗА

О. В. Косарев, к.т.н., доцент кафедры ИиКТ СПГУ, Санкт-Петербург, Россия;
orcid.org/0000-0003-3427-6593, e-mail: oleg.v.kosarev@gmail.com
Е. Г. Дементьева, к.ф.-м.н., доцент кафедры ИиКТ СПГУ, Санкт-Петербург, Россия;
orcid.org/0000-0002-6793-804X, e-mail: ek.vodkailo@yandex.ru
Е. В. Катунцов, к.т.н., доцент кафедры ИиКТ СПГУ, Санкт-Петербург, Россия;
orcid.org/0000-0001-8345-0979, e-mail: katuntsov@gmail.com
Я. А. Лунтовская, магистрант СПГУ, Санкт-Петербург, Россия;
orcid.org/0000-0001-9694-4732, e-mail: yanaluntovskaya@yandex.ru
Д. А. Кателевский, студент СПГУ, Санкт-Петербург, Россия;
orcid.org/0000-0002-5768-5798, e-mail: katelevskiyd@gmail.com

Рассматривается задача совмещения двумерных изображений, полученных при последовательном сканировании внутренней поверхности помещений (внутренней поверхности частично замкнутого пространства). ***Целью работы*** *является получение алгоритма совмещения по плоским координатам и углу поворота двух последовательных изображений в условиях ошибки перемещения сканера и отсутствия сигналов коррекции положения от внешних источников. Двумерное изображение формируется сканером, как облако точек границы помещения (точек отражения сигнала сканера от стен помещения). Два последовательных изображения смещены и повернуты относительно друг друга на величины, отличные от шага сканера. Определяется область пересечения двух изображений и формируются два вспомогательных подмножества точек. Каждое вспомогательное подмножество точек преобразуются в разностный вектор-контур в комплекснозначном пространстве. Методами контурного анализа определяется угол рассогласования двух изображений и их относительный сдвиг в плоских координатах. На основании этой информации последующее изображение совмещается с предыдущим с учетом компенсации ошибки перемещения сканера.*

Ключевые слова: *совмещение изображений, контурный анализ, вектор-контур в комплекснозначном пространстве, slam-метод, сканер, облако точек, двумерное изображение, ультразвуковое сканирование.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-24-34

Введение

Рассматривается задача совмещения двумерных изображений помещений (внутренней поверхности частично замкнутого пространства), полученных при последовательном перемещении сканера. Такая задача может возникнуть при поиске эталонных изображений на снимках спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии [1, 2], создании двумерных и трехмерных изображений горной выработки в ходе маркшейдерской съемки [3, 4], а также при разработке и совершенствовании алгоритмов slam навигации, в том числе в условиях подземных работ [5-9]. Сканер изображения состоит из дальномера (безотносительно способа измерения дальности) и системы поворота дальномера на заданный угол. Изображение со сканера представляет собой массив координат точек внутренней поверхности помещения и угла поворота сканера, полученных в результате сканирования (облако точек). При каждом сканировании облако точек формируется в локальной системе координат сканера, где сканер является центром координат. Расстояние до точки сканирования и угол поворота сканера рассчитываются относительно точки стояния сканера. Полное изображение помещения получается путем совмещения последовательности изображений со сканера, полученных при его перемещении. При каждом перемещении сканера координаты точек пере-

считываются на величину перемещения сканера и с учетом угла поворота сканера. Шаг перемещения сканера и направление нулевого угла сканирования определяются при помощи одометрической системы. При перемещении сканера (особенно с помощью самодвижущейся платформы) неизбежно возникают накапливающиеся ошибки определения точки стояния и угла поворота сканера. Полное изображение в таком случае окажется размытым (при небольших ошибках) и искаженным до невозможности использования (при большой накопленной ошибке). Такие ошибки требуют корректировки с помощью внешних систем позиционирования. На открытой местности это могут быть сигналы GPS, а в подготовленном помещении в качестве корректирующей системы могут быть использованы радио- или оптические маяки [10-12]. В условиях подземной выработки применение таких систем и способов корректировки положения сканера может быть затруднено в силу запыленности воздуха, разрушения маяков после аварии или невозможно в принципе (GPS). Известные способы совмещения изображений, как правило, основаны на выделении особых точек в изображении и итеративных алгоритмах совмещения по этим точкам [13-15]. В настоящей работе предлагается корректировать положение каждого последующего облака точек (совмещать последовательные изображения с учетом ожидаемого перемещения сканера) на основе информации о предыдущем. При небольшом, относительно линейных размеров пространства, шаге перемещения сканера значительная часть точек облака будет описывать одни и те же точки отражения сигнала сканера на поверхности помещения. За счет такой избыточности информации о сканируемой поверхности возможно совмещение последовательных изображений по их пересекающейся части. Решение задачи совмещения изображений возможно с помощью методов контурного анализа [16]. В результате совмещения последовательных изображений будет получено полное неискаженное или искаженное незначительно изображение помещения. Работа выполнена в рамках научной школы «Цифровая трансформация горной и минеральной отрасли» Санкт-Петербургского горного университета [17-23].

Теоретическая часть

Исследуемым пространством может быть заброшенная шахта, аварийное помещение и др. Сканер состоит из дальномера и системы поворота дальномера. Изображение от сканера представляет собой множество точек координат внутренней поверхности исследуемого пространства. Рассматривается двумерное изображение. Фактически рассматривается контур внутренней поверхности сканируемого пространства. Поэтому определения «изображение» и «контурное изображение» тождественны. В полярных координатах каждый элемент множества задан расстоянием от точки стояния сканера до точки сканирования поверхности и углом поворота сканера относительно нулевого положения. В декартовых координатах каждый элемент множества задан соответствующими координатами. В общем случае линейные размеры сканируемого пространства превышают возможности дальномера и сканер приходится последовательно перемещать по некоторой траектории в новую точку сканирования. Если шаг сканирования не превышает возможности дальномера, то два последовательных изображения будут сформированы с перекрытием, тем самым создав избыточность информации о сканируемой поверхности. Перемещение сканера предпочтительно выполнять при помощи самодвижущейся платформы. В этом случае неизбежны ошибки перемещения в новую точку сканирования, например, в силу неточности работы механического привода, проскальзывания колес или гусениц платформы и ряда других причин. Рассмотрим модель помещения и модель сканирования из двух точек, созданную в Mathcad. На рисунке 1 показано сканирование участков двух параллельных стен *6* из точек стояния *1* и *2* в пределах рабочей зоны дальномера *5* без ошибки перемещения и угла поворота сканера с полным перекрытием. После сканирования формируются два облака точек *PC*1 (*3*) и точек *PC*2 (*4*). Сканер последовательно по окружности через равные углы сканирует окружающее пространство из точки *1* с координатами point1 (*X*;*Y*). Пределы рабочей зоны дальномера ограничены воображаемой окружностью с радиусом, равным максимальной дальности измерения *5*. Если в пределах

воображаемой окружности встречается препятствие *6*, то формируется облако точек *3* или изображение сканируемой поверхности. Каждая точка изображения имеет свои координаты. После завершения сканирования сканер перемещается с шагом (step$X$ = 0; step$Y$ = 1,5) в следующую точку (*2*) с координатами point2(X;Y) = point1(X;Y)+(step$X$; step$Y$) и формирует новое изображение *4*. Так как перемещение в точку сканирования *2* выполнено безошибочно, то облака точек *PC*1 и *PC*2 совпадают. Это идеальная ситуация.

На рисунке 2 показано перемещение сканера с ошибкой по координатам и углу поворота. Вследствие ошибки перемещения сканера новое изображение будет смещено и повернуто на случайный угол относительно предыдущего в плоскости перемещения сканера. Вместо точки (*2*) сканер перемещается в точку (*2`*), и будет получено смещенное изображение *PC*2` (*4`*). В данном случае ошибка позиционирования сканирования с учетом работы генератора случайных чисел Mathcad составила d$X$=0,595; d$Y$= -0,108. Соответственно точка (*2`*) имеет координаты point2`(X;Y)=point1(X;Y)+(step$X$+dX; step$Y$+dY) = (0,595;1,392). Угол поворота был задан 20 градусов.

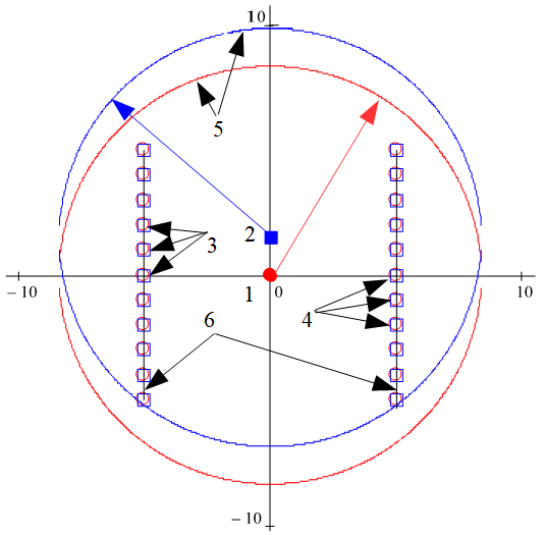

Рисунок 1 – Перемещение сканера без ошибки
Figure 1 – Moving the scanner without error

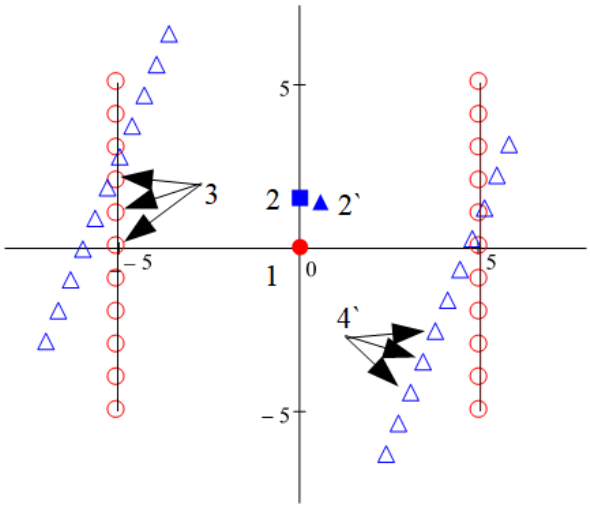

Рисунок 2 – Перемещение сканера с ошибкой
Figure 2 – Moving the scanner with error

Задача заключается в том, чтобы определить угол поворота и смещение изображения *PC*2` относительного *PC*1 и совместить их обратно с учетом ожидаемого перемещения сканера. Полученные изображения по своей сути является бинарными, поэтому целесообразно представить их в виде разностных вектор-контуров в комплекснозначном пространстве [16].

Представим изображения (*3* и *4`* на рисунке 2) как k-мерные вектор-контуры первой разности $PC_C^k=\{\gamma(n)\}_{0,k-1}$ в комплекснозначном пространстве C^k, где k – количество точек изображения (рисунок 2). Каждая точка изображения записывается в комплекснозначном пространстве, где реальная часть представлена координатой точки по оси Ox, а мнимая – координатой по оси Oy. Совокупность точек описывает контур изображения как пучок векторов $\beta(n)$ из центра сканирования. Разность координат любой пары соседних точек образует вектор первой разности: $\gamma(n)=\beta(n+1)-\beta(n)$. Упорядоченное множество векторов первой разности (при последовательном переборе точек изображения) составляет k-мерный вектор-контур первой разности в комплекснозначном пространстве ($PC1_C^k$ и $PC2_C^k$) (рисунок 3).

Для указанных изображений в пакете Mathcad были выполнены некоторые преобразования. Координаты точек в каждом изображении были преобразованы в комплексную форму. Затем для каждого изображения были вычислены вектор-контуры первой разности в комплексной форме.

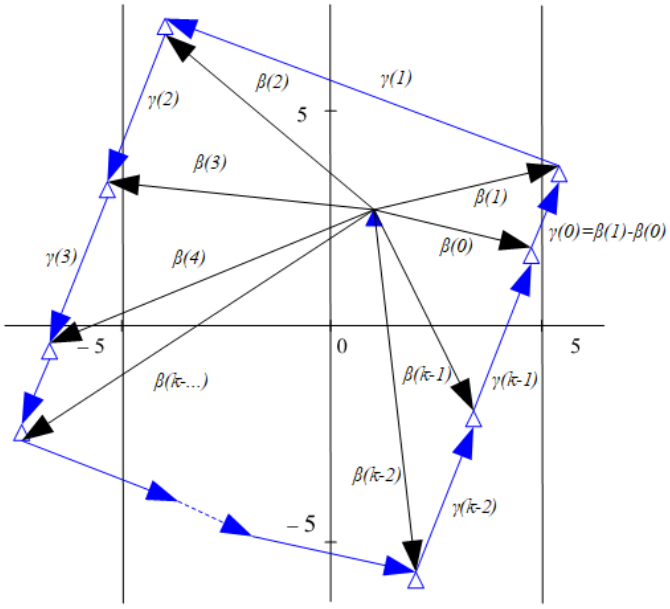

Рисунок 3 – Изображение в виде *k*-мерного вектор-контура первой разности
Figure 3 – Image as a *k*-dimensional vector-contour of the first difference

Скалярное произведение $(PC1,\ PC2)_{C^k}$ векторов $PC1_{C^k}$ и $PC2_{C^k}$ в общем виде описывается выражением:

$$\left(PC1, PC2\right)_{C^k} = \sum_{i=0}^{k-1}\left(Re\left(PC1_{C^k{}_i}\right)\cdot Re\left(PC2_{C^k{}_i}\right) + Im\left(PC1_{C^k{}_i}\right)\cdot Im\left(PC2_{C^k{}_i}\right)\right) + \\ + i\cdot\sum_{i=0}^{k-1}\left(Re\left(PC1_{C^k{}_i}\right)\cdot Im\left(PC2_{C^k{}_i}\right) - Im\left(PC1_{C^k{}_i}\right)\cdot Re\left(PC2C^k{}_i\right)\right). \quad (1)$$

Аргумент скалярного произведения двух изображений $\arg((PC1,\ PC2`)_{C^k})$ равен углу поворота изображения $PC2`$ относительно $PC1$ [16]. Поворот изображения $PC2`$ на этот угол в обратную сторону исправит ошибку углового положения сканера. Угол поворота изображения $PC2`$ относительно $PC1$ был определен как аргумент скалярного произведения вида (1). Результат поворота изображения $PC2`$ на этот угол показан на рисунке 4.

Теперь необходимо определить смещение изображения (точки сканирования) относительно ожидаемого положения (исходная точка сканирования плюс шаг перемещения). Для этого необходимо вычислить центры масс опорного и повернутого изображений. Центр масс изображения PC_{C^k} определяется по формулам [16]:

$$x_{aa} := \frac{1}{cols\left(aa\right)}\cdot\sum_{i=ORIGIN}^{cols(aa)-1}\mathrm{Re}\left(aa_{0,i}\right) = 0;\ y_{aa} := \frac{1}{cols\left(aa\right)}\cdot\sum_{i=ORIGIN}^{cols(aa)-1}\mathrm{Re}\left(aa_{0,i}\right) = 0. \quad (2)$$

Вычислим центр масс для контура $PC1$ и повернутого контура $PC2`$. Разница центров масс повернутого и опорного изображений есть смещение контура. Остается только поточечно сместить повернутый контур $PC2`$ на эту разницу (вычесть из координат каждой точки разницу центров масс). На рисунке 5 показан смещенный контур $PC2`$. Как видно из сравнения рисунков 1 и 5, удалось полностью совместить два изображения. В силу того, что пример полностью смоделирован в Mathcad, в качестве меры оценки качества совмещения изображений примем визуальную экспертную оценку.

Таким образом, задача совмещения изображений решается в три этапа (алгоритм совмещения изображений): вычисление вектор-контуров изображений, вычисление скалярного произведения вектор-контуров, вычисление центров масс изображений. Применим циклически эти операции в нужной последовательности к набору из 10 изображений модели пространства.

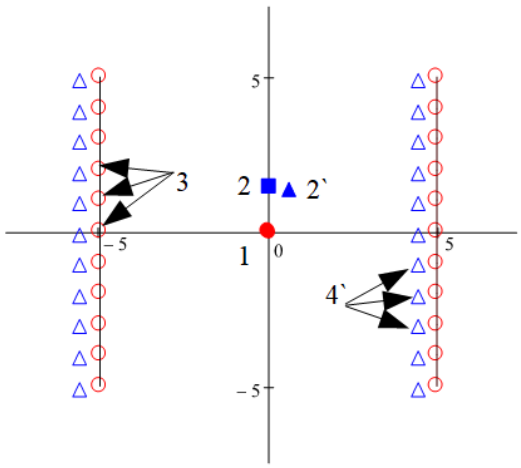

Рисунок 4 – Поворот изображения
Figure 4 – Image rotation

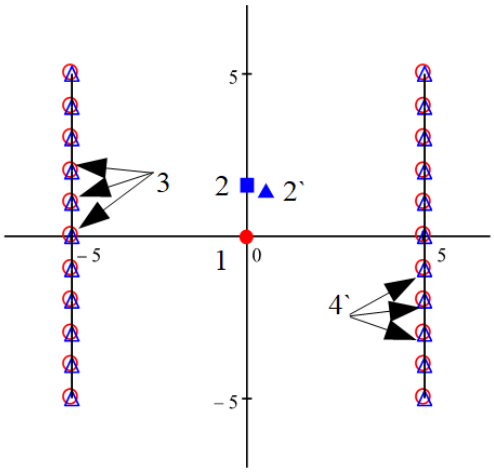

Рисунок 5 – Сдвиг изображения
Figure 5 – Image shift

Экспериментальные исследования

Для проверки корректности работы алгоритма был проведен эксперимент по сканированию ультразвуковым сканером внутренней поверхности П-образной модели замкнутого с одной стороны пространства. Стенки модели выполнены из картона и оргстекла. Размеры модели 120×80 см (рисунок 6). Выполнено 10 круговых сканирований от 0 до 360 градусов. Сканер последовательно вручную перемещался по средней линии модели (вдоль длинной стороны). В каждой точке выполнено 73 измерения расстояния от сканера до стенки модели с шагом 4,932 градуса. Количество измерений в каждом сканировании определяется характеристиками шагового двигателя, используемого для вращения ультразвукового модуля. Экспериментальная установка была собрана на двигателе 28ybj-48-5V и ультразвуковом модуле US-15. Управление вращением датчика, пересчет координат из полярной системы координат в прямоугольную и запись массива координат на карту памяти выполнены при помощи программируемого микроконтроллера. Заявленная в документации ультразвукового датчика точность измерения расстояния 0,1 см + 1 %, диапазон измеряемых расстояний от 2 до 400 см. В рамках эксперимента максимальное измеряемое расстояние программно ограничено до 50 см. Расчет расстояния до препятствия выполняется в датчике, в программе обработки использовано готовое значение расстояния с цифрового выхода датчика. Координаты точки отражения сигнала датчика в прямоугольной системе координат и номер угла поворота модуля (облако точек) записываются в отдельный файл для каждой точки сканирования.

Рисунок 6 – П-образная модель пространства
Figure 6 – U-shaped room model

Если отраженного сигнала нет (расстояние превышает максимально разрешенные 50 см), то в файл с координатами записывается значение NaN. Ограничение максимального диапазона измерений сделано для того, чтобы исключить влияние на опыт объектов, расположенных за пределами модели. Результат сканирования записывается в файл в виде массива строк. Каждая строка содержит координату X и Y точки отражения сигнала и номер угла сканирования.

Облако точек обрабатывается и визуализируется в Mathcad. На рисунке 7 показано изображение модели в виде облака точек (красные кружки). В процессе эксперимента сканер перемещался вручную без преднамеренной ошибки положения и ошибки угла поворота в пределах возможностей визуального контроля. Поэтому будем считать массив изображений на рисунке 7 эталонным. Реальный (ожидаемый) контур модели показан на рисунке пунктиром.

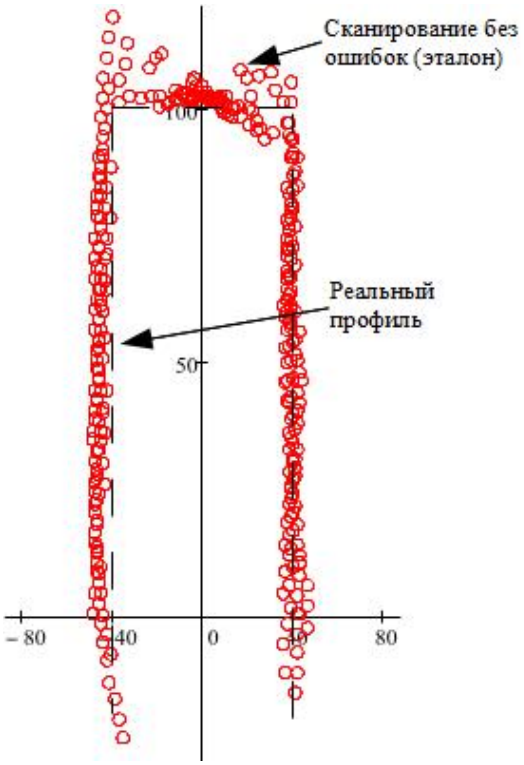

Рисунок 7 – Облако точек (изображение) модели пространства
Figure 7 – Cloud of points (image) of the room model

Программно внесем в каждый массив сканирования равномерно распределенную ошибку положения и угла поворота. Будем считать, что эти ошибки возникли в результате перемещения сканера самодвижущейся платформой. Дополнительно, для удобства визуального сравнения, проредим массив изображения, представив близко расположенные точки одной точкой с усредненными координатами. Прореживание массива точек изображения используется только для лучшего визуального различения изображений до и после коррекции непосредственно перед построением графика и не вносит изменения в координаты точек в процессе совмещения изображений. Результаты сканирования с ошибкой, без совмещения изображений каждого шага между собой по предлагаемому алгоритму, показаны в левой части рисунка 8 (синие треугольники).

Приступим к реализации алгоритма совмещения изображений: вычислению вектор-контуров изображений, вычислению скалярного произведения вектор-контуров, вычислению центров масс изображений. Поскольку размерности двух последовательных экспериментальных изображений различаются, то для последующей обработки их необходимо уравнять. Правильно было бы оставить в изображениях только пересекающиеся части. Но такая операция будет иметь смысл только в случае правильных координат точек изображений. Так как эту задачу и предстоит решить, то такой способ не подходит. Поэтому уравняем размерности

изображений по общим номерам углов сканирования в двух последовательных изображениях. Сначала найдем пересечение множеств углов двух изображений, а затем пересечение множества углов каждого исходного изображения с множеством пересечения. В результате два последовательных изображения будут иметь одинаковую размерность.

Теперь все подготовительные операции выполнены и можно приступать к программной реализации алгоритма. В Mathcad была написана итоговая функция коррекции сдвига и угла поворота изображений. Функция в цикле выполняет вычисление вектор-контура изображения, скалярного произведения вектор-контуров, центров масс изображений для каждой пары последовательных изображений. Первое изображение считается эталонным, относительно него производится по описанному выше алгоритму коррекция второго изображения. После коррекции по прямоугольным координатам и углу второе изображение считается эталонным. Третье изображение корректируется относительно второго и так далее, до последнего изображения включительно. Результат коррекции ошибочного изображения (левая часть рисунка 8) этой функцией показан на рисунке 8 справа. Как видно из сравнения рисунка 7 и правой части рисунка 8, визуально изображения совпадают практически полностью, что подтверждает корректность работы предложенного алгоритма. Количественную оценку качества совмещения изображений целесообразно проводить после определения области и условий применения алгоритма.

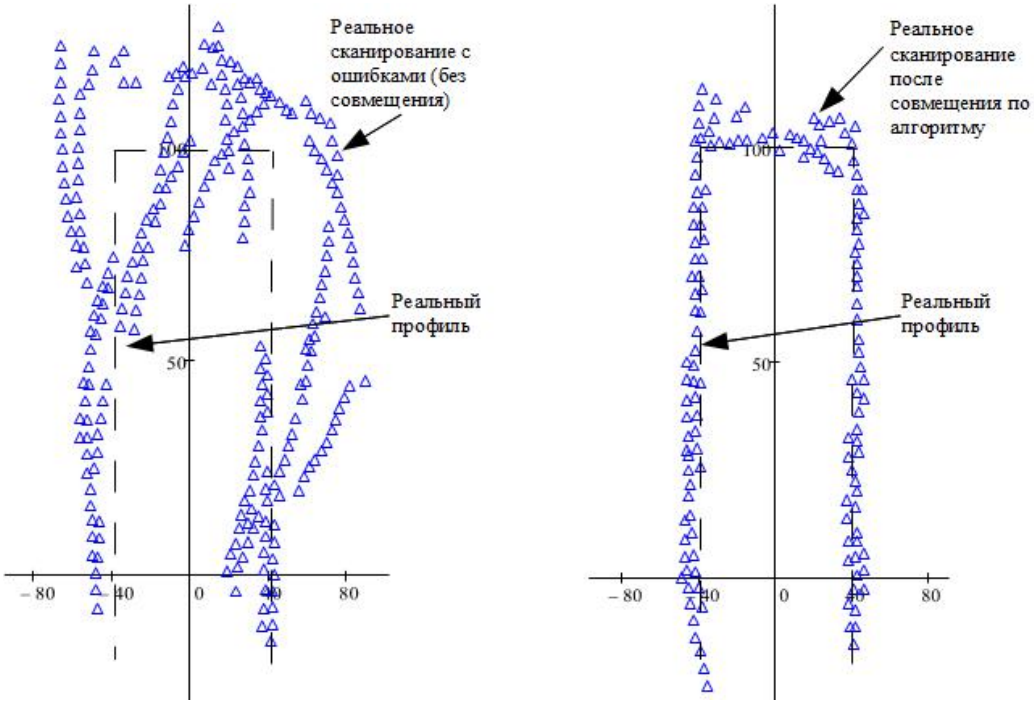

Рисунок 8 – Результат работы алгоритма совмещения изображений
Figure 8 – Result of image matching algorithm

Заключение

В статье предложен алгоритм совмещения изображений методами контурного анализа. Последовательность из 10 изображений получена в результате ультразвукового сканирования П-образной модели частично замкнутого пространства. В координаты точек всех изображений кроме первого были внесены ошибки. В результате накопления ошибок итоговый контур сканируемого пространства сильно исказился. Предложенный алгоритм позволил исправить внесенные по координатам точек и углу поворота ошибки и практически полностью совместить изображения с ошибками с эталонными изображениями. Предложенный алгоритм может быть использован в slam-системах как составной элемент 2D-навигации [24, 25], системах распознавания изображений, системах обработки изображений компьютерных томографов и др.

Библиографический список

1. **Ilyukhin D. A, Ivanik S. A., Vystrchil M. G., Kachan D. S., Savchenko A. V.** Technologies for obtaining and processing of space radar images for monitoring the state of the Earth's surface // Journal of Physics: Conference Series. 2021, no. 1661, pp. 1-7.

2. **Ponomarenko M. R., Kutepov Y. I., Volkov M. A. et al.** Satellite methods within integrated land surface deformation monitoring in a mine field // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020, issue 12, vol. 2020, pp. 103-113. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.

3. **Данько А. В., Сухов А. К., Выстрчил М. Г., Гусев В. Н.** Перспективы использования Microsoft kinect в лазерном сканировании // Естественные и технические науки. 2019. № 7 (133). С. 164-166.

4. **Рахаткулов Д. Х., Выстрчил М. Г.** Маркшейдерское обеспечение горных работ с применением лидарных систем // Маркшейдерский вестник. 2016. № 4 (113). С. 23-25.

5. **Kosarev O. V., Tcvetkov P. S., Makhovikov A. B., Vodkaylo E. G., Zulin V. A., Bykasov D. A.** Modeling of industrial iot complex for underground space scanning on the base of arduino platform // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources – Proceedings Of The International Forum-Contest of Young Researchers. 2018, pp. 407-412.

6. **Losch R., Grehl S., Donner M., Buhl C., Jung B.** Design of an Autonomous Robot for Mapping, Navigation, and Manipulation in Underground Mines. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). DOI:10.1109/iros.2018.8594190.

7. **Grehl, Steve & Mischo, Helmut & Jung, Bernhard.** Research perspective – mobile robots in underground mining: Using robots to accelerate mine mapping, create virtual models, assist workers and increase safety // AusIMM Bulletin. 2017, pp. 44-47.

8. **Plotnikov N. S., Kolokoltseva E. U., Volkova Y. V.** Technical Review of Robotic Complexes for Underground Mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, 459, 042025. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042025.

9. **Günther, Franziska & Mischo, Helmut & Lösch, Robert & Grehl, Steve & Güth, Frederic.** Increased safety in deep mining with IoT and autonomous robots. 2019. DOI: 10.1201/9780429320774-70.

10. **Алешин С. В.** Сравнительный анализ существующих систем INDOOR навигации мобильных роботов для решения задачи SLAM // Наука настоящего и будущего. 2018. Т. 1. С. 285-289.

11. **Huletski A., Kartashov D., Krinkin K.** TinySLAM improvements for indoor navigation // IEEE Intern. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. 2016, pp. 144-152.

12. **Le X.S., Fabresse L., Bouraqadi N., Lozenguez G**. Evaluation of Out-of-the-Box ROS 2D SLAMs for Autonomous Exploration of Unknown Indoor Environments // Intelligent Robotics and Applications. 2018, pp. 283-296.

13. **Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D.** Fast image registration algorithm for automated inspection of laser micromachining // Computer Optics. 2014, 38(2), 343-350. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-343-350.

14. **Wang, W., Jiang, Y., Kuang, G., Zhao, L., & Xiong, B.** Contour matching using the affine-invariant support point set. IET Computer Vision. 2014, 8(1), 35-44. DOI: 10.1049/iet-cvi.2013.0031.

15. **Сунгатуллина Д., Крылов А.** Быстрый алгоритм совмещения контуров изображений, связанных изотропным аффинным преобразованием // ГРАФИКОН 2014. Труды конференции. Академия архитектуры и искусств, Институт механики, математики и компьютерных наук, Южный федеральный университет. 2014. С. 92-95.

16. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Под ред. **А. Я. Фурмана**. – 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 592 с.

17. **Игнатьев С. А., Судариков А. Е., Имашев А. Ж.** Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного Института. Том 238. С. 371. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.371.

18. **Gogolinskiy K. V., Syasko V. A.** Prospects and challenges of the fourth industrial revolution for instrument engineering and metrology in the field of non-destructive testing and condition monitoring // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2019, issue 8, vol. 61, pp. 434-439, 447. DOI: 10.1784/insi.2019.61.8.434.

19. **Koteleva N., Buslaev G., Valnev V. et al.** Augmented reality system and maintenance of oil pumps // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2020, issue 8, vol. 33, pp. 1620-1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20.

20. **Litvinenko V. S.** Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector. Natural Resources Research. 2020, issue 3, vol. 29, pp. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.

21. **Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K., Arapova E. G. et al.** Digital platform as a means of process optimization of integrating electric vehicles into electric power networks // Journal of Physics: Conference Series. 2020, issue 1, vol. 1661. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012162.

22. **Chepyzhova A. V., Pravdina E. A., Lepikhina O. Yu.** Comparative evaluation of the effectiveness of the laser scanning and aerial photography systems using unmanned aerial vehicles // Journal of Physics: Conference Series. 2019, issue 3, vol. 1333. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032064.

23. **Kuzin A. A., Kovshov S. V.** Accuracy evaluation of terrain digital models for landslide slopes based on aerial laser scanning results // Ecology, Environment and Conservation. 2017, issue 2, vol. 23, pp. 908-914.

24. **Wooden D., Malchano M., Blankespoor K., Howard A., Rizzi A., & Raibert M.** Autonomous navigation for BigDog // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2010, 4736-4741.

25. **Vasilopoulos, V., Arslan, O., De, A., & Koditschek, D. E.** Sensor-based legged robot homing using range-only target localization // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2017. DOI: 10.1109/robio.2017.8324816.

UDC 004.932.2

ALGORITHM OF TWO-DIMENSIONAL IMAGES MATCHING BY CONTOUR ANALYSIS METHODS

O. V. Kosarev, PhD (technical sciences), associate professor of Informatics SPMU, Saint Petersburg, Russia;
orcid.org/0000-0003-3427-6593, e-mail: oleg.v.kosarev@gmail.com
E. G. Dementieva, PhD in physics and mathematics, associate professor, department of Informatics, SPMU, Saint Petersburg, Russia;
orcid.org/0000-0002-6793-804X, e-mail: ek.vodkailo@yandex.ru
E. V. Katuntsov, PhD (technical sciences), associate professor of Informatics SPMU, Saint Petersburg, Russia;
orcid.org/0000-0001-8345-0979, e-mail: katuntsov@gmail.com
Y. A. Luntovskaya, master student, SPMU, Saint Petersburg, Russia;
orcid.org/0000-0001-9694-4732, e-mail: yanaluntovskaya@yandex.ru
D. A. Katelevsky, student, SPMU, Saint Petersburg, Russia;
orcid.org/0000-0002-5768-5798, e-mail: katelevskiyd@gmail.com

The problem of two-dimensional images matching obtained by successive scanning of internal surface of premises (internal surface of partially enclosed space) is considered. ***The aim is to*** *obtain an algorithm for matching of two consecutive images by plane coordinates and rotation angle in the conditions of an error in scanner movement and the absence of position correction signals from external sources. A two-dimensional image is formed by a scanner as a cloud of interference boundary points (points of reflection of scanner signal from the walls of the room). Two consecutive images are shifted and rotated relative to each other by the values different from a scan step. The area of intersection of two images is determined and two auxiliary subsets of points are formed. Each auxiliary subset of points is transformed into a difference vector-contour in complex-valued space. Contour analysis methods determine the angle of mismatch between two images and their relative shift in plane coordinates. Based on this information, a subsequent image is combined with the previous one, considering the compensation of scanner movement error.*

Key words: *image matching, contour analysis, vector-contour in complex-valued space, slam-method, scanner, point cloud, two-dimensional image, ultra-sound scanning.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-24-33

References

1. **Ilyukhin D. A, Ivanik S. A., Vystrchil M. G., Kachan D. S., Savchenko A. V.** Technologies for obtaining and processing of space radar images for monitoring the state of the Earth's surface. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, no. 1661, pp. 1-7.

2. **Ponomarenko M. R., Kutepov Y. I., Volkov M. A. et al.** Satellite methods within integrated land surface deformation monitoring in a mine field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020, issue 12, vol. 2020, pp. 103-113. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.

3. **Dan`ko A.V., Suhov A. K., Vystrchil M. G., Gusev V. N.** Perspektivy ispol'zovaniya Microsoft kinect v lazernom skanirovanii. *Estestvennye i tehnicheskie nauki.* 2019, no. 7 (133), pp. 164-166 (in Russian).

4. **Rahatkulov D. H., Vystrcil M. G.** Markshejderskoe obespechenie gornyh rabot s primeneniem lidarnyh sistem. *Markshejderskij vestnik.* 2016. No. 4 (113). pp. 23-25 (in Russian).

5. **Kosarev O. V., Tcvetkov P. S., Makhovikov A. B., Vodkaylo E. G., Zulin V. A., Bykasov D. A.** Modeling of industrial iot complex for underground space scanning on the base of arduino platform. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources – Proceedings Of The International Forum-Contest of Young Researchers*. 2018, pp. 407-412.

6. **Losch R., Grehl S., Donner M., Buhl C., Jung B.** Design of an Autonomous Robot for Mapping, Navigation, and Manipulation in Underground Mines. 2018 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. DOI:10.1109/iros.2018.8594190.

7. **Grehl, Steve & Mischo, Helmut & Jung, Bernhard.** Research perspective – mobile robots in underground mining: Using robots to accelerate mine mapping, create virtual models, assist workers and increase safety. *AusIMM Bulletin*. 2017, pp. 44-47.

8. **Plotnikov N. S., Kolokoltseva E. U., Volkova Y. V.** Technical Review of Robotic Complexes for Underground Mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, 459, 042025. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042025.

9. **Günther, Franziska & Mischo, Helmut & Lösch, Robert & Grehl, Steve & Güth, Frederic.** Increased safety in deep mining with IoT and autonomous robots. 2019. DOI: 10.1201/9780429320774-70.

10. **Aleshin S. V.** Sravnitel'nyj analiz sushhestvujushhih sistem INDOOR navigacii mobil'nyh robotov dlja reshenija zadachi SLAM. *Nauka nastojashhego i budushhego*. 2018, vol. 1, pp. 285-289. (in Russian).

11. **Huletski A., Kartashov D., Krinkin K.** TinySLAM improvements for indoor navigation. IEEE Intern. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. 2016. P. 144-152.

12. **Le X.S., Fabresse L., Bouraqadi N., Lozenguez G**. Evaluation of Out-of-the-Box ROS 2D SLAMs for Autonomous Exploration of Unknown Indoor Environments. *Intelligent Robotics and Applications*. 2018, pp. 283-296.

13. **Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D.** Fast image registration algorithm for automated inspection of laser micromachining. *Computer Optics*. 2014, 38(2), 343-350. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-343-350.

14. **Wang, W., Jiang, Y., Kuang, G., Zhao, L., & Xiong, B.** Contour matching using the affine-invariant support point set. *IET Computer Vision*. 2014, 8(1), 35-44. DOI: 10.1049/iet-cvi.2013.0031.

15. **Sungatullina D., Krylov A.** Bystryj algoritm sovmeshhenija konturov izobrazhenij, svjazannyh izotropnym affinnym preobrazovaniem. *GRAPHON 2014. Trudy konferencii. Akademija arhitektury i iskusstv, Institut mehaniki, matematiki i komp'juternyh nauk, Juzhnyj federal'nyj universitet.* 2014, pp. 92-95 (in Russian).

16. *Vvedenie v konturnyj analiz i ego prilozhenija k obrabotke izobrazhenij i signalov* (Introduction to contour analysis and its applications to image and signal processing). Ed. by **A. Ya.Furman**. 2nd ed., ispr. Moscow: FIZMATLIT, 2003, 592 p. (in Russian).

17. **Ignat'ev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Zh.** Sovremennye matematicheskie metody prognoza uslovij podderzhanija i kreplenija gornyh vyrabotok. *Zapiski Gornogo Instituta*, vol. 238, pp. 371-375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371 (in Russian).

18. **Gogolinskiy K. V., Syasko V. A.** Prospects and challenges of the fourth industrial revolution for instrument engineering and metrology in the field of non-destructive testing and condition monitoring. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2019, issue 8, vol. 61, pp. 434-439+447. DOI: 10.1784/insi.2019.61.8.434.

19. **Koteleva N., Buslaev G., Valnev V. et al.** Augmented reality system and maintenance of oil pumps. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2020, issue 8, vol. 33, pp. 1620-1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20.

20. **Litvinenko V. S.** Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector. Natural Resources Research. 2020, issue 3, vol. 29, pp. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.

21. **Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K., Arapova E. G. et al.** Digital platform as a means of process optimization of integrating electric vehicles into electric power networks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, issue 1, vol. 1661. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012162.

22. **Chepyzhova A. V., Pravdina E. A., Lepikhina O. Yu.** Comparative evaluation of the effectiveness of the laser scanning and aerial photography systems using unmanned aerial vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, issue 3, vol. 1333. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032064.

23. **Kuzin A. A., Kovshov S. V.** Accuracy evaluation of terrain digital models for landslide slopes based on aerial laser scanning results. Ecology. *Environment and Conservation*. 2017, issue 2, vol. 23, pp. 908-914.

24. **Wooden D., Malchano M., Blankespoor K., Howard A., Rizzi A., & Raibert M.** Autonomous navigation for BigDog. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2010, 4736-4741.

25. **Vasilopoulos, V., Arslan, O., De, A., & Koditschek, D. E.** Sensor-based legged robot homing using range-only target localization. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. DOI: 10.1109/robio.2017.8324816.