

Разработка алгоритма построения оптимального пути на основе плана помещения для измерительного робота

Ю.А. Андриенко, С.Ю. Донецкий

Аннотация—Современный уровень развития робототехники позволяет использовать роботов для выполнения многих задач. Отдельный класс задач - работа в условиях, представляющих опасность для жизни и здоровья человека, в частности, работа на объектах атомной промышленности с повышенным радиационным фоном. Зачастую на таких объектах существуют проблемы с покрытием всей площади объекта беспроводным сигналом связи. В такой ситуации становятся недоступны дистанционные схемы управления измерительным роботом. Одним из вариантов управления роботом в подобных условиях является автономный режим работы по заранее подготовленному на основе плана объекта заданию. Данную глобальную задачу можно представить, как совокупность более простых подзадач, некоторые из них будут рассмотрены в этой статье, в частности - оцифровка изображения с планом помещения и преобразование его в координатный массив препятствий; построения пути от начальной точки до конечной с учетом препятствий; выбор оптимального алгоритма построения пути на основе вида плана помещения. При оцифровке изначально загружается исходное изображение в оттенках серого, которое затем бинаризуется с использованием алгоритма Оцу, полученное на выходе изображение далее преобразуется в массив координат препятствий. Для построения пути используются три различных алгоритма - алгоритм Дейкстры, алгоритм поиска A* и алгоритм поиска D*. С использованием каждого алгоритма проводится расчёт пути для нескольких помещений. Далее рассматривается вариант реализации выбора оптимального алгоритма построения пути с использованием методов машинного обучения для определения сходных изображений. Для каждого изображения в заранее подготовленном наборе данных известен оптимальный алгоритм, который так же рекомендуется для использования для изображения, которое определяется как «сходное» для соответствующего изображения из набора данных.

Ключевые слова—Алгоритмы поиска пути, роботизированные измерительные комплексы, машинное обучение, цифровая обработка изображений.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития робототехники позволяет решать широкий спектр задач. Использование роботов в условиях, где жизнь и здоровье человека могут подвергаться опасности - одна из таких задач. В недавно вышедшей статье [1] рассматривается возможность применения роботов для проведения радиационных измерений на объектах атомной

промышленности. Вопросы навигации в замкнутых помещениях и систем картографирования таких помещений обсуждались в работах [2,3]. На подобных объектах, в частности, в зонах, в которых возможно значительное превышение радиационного фона нередко используются толстые стены, которые препятствуют распространению жесткого излучения. Подобные препятствия так же ограничивают зону покрытия беспроводного сигнала на таких объектах.

Чтобы преодолеть данные ограничения и обеспечить работоспособность измерительных комплексов в отсутствии удаленных управляющих сигналов необходимо реализовать автономный режим работы. Видится два возможных подхода реализации автономного режима работы. В первом случае измерительный комплекс строит маршрут на основе показаний специальных сенсоров в режиме реального времени и определенной периодичностью выполняет измерения. Во втором случае робот выполняет заранее подготовленное на основе плана помещения задание, которое включает в себя траекторию пути (набор управляющих сигналов для следования по заданной траектории) и точки, в которых необходимо выполнять измерения, при этом необходимость корректировки траектории в процессе движения на основе данных с датчиков не исключается. Второй подход выглядит более подходящим для поставленной ранее задачи, так как позволяет оптимизировать плотность и частоту выполняемых измерений основываясь на знании местонахождения предполагаемых источников. Кроме того, изначально рассчитанная траектория перемещения между конкретными точками измерений будет всегда короче, чем траектория, с помощью которой необходимо покрыть всю площадь исследуемого объекта (такая траектория будет выстроена в первом варианте работы). Так же можно отметить, что жесткое рентгеновское и гамма излучение способно выводить из строя бортовую электронику измерительного комплекса. При подготовке задания можно учесть этот факт и скорректировать траекторию робота таким образом, чтобы он избегал перемещения через зоны, интенсивность излучения в которых могла бы вывести его из строя, в случае работы в первом режиме подобный механизм защиты при построении траектории заложить невозможно. Из всего вышперечисленного можно сделать вывод, что проведение измерений на основе заранее подготовленного задания позволяет значительно сократить сроки выполнения работ и обезопасить измерительный комплекс от повреждения при их проведении.

Задание на проведение измерений фактически представляет собой совокупность управляющих сигналов на различные приводы, которые обеспечивают

Статья получена 05.07.2023.

Андриенко Юрий Анатольевич, к.ф.м.н., доцент МИФИ,

yand@outlook.com

Донецкий Сергей Юрьевич, ООО «Прототип», doser2991@gmail.com

необходимое перемещение измерительного комплекса в пространстве и запись соответствующих сигналов при достижении комплексом точек-ориентиров. Для формирования набора управляющих сигналов необходимо построить траекторию, по которой должен двигаться измерительный комплекс. Чтобы построить траекторию необходимо иметь пространственную карту расположения препятствий (как механических, так и иной природы, например зону с критически высоким уровнем интенсивности ионизирующего излучения, способным вывести электронику из строя, можно так же рассматривать как препятствие). Далее необходимо в одном пространстве координат с картой препятствий указать начальную позицию измерительного комплекса и все точки, в которых необходимо произвести измерения. Карта препятствий, начальная точка и точки выполнения измерений являются входными параметрами алгоритма построения пути. На сегодняшний день существует множество алгоритмов построения оптимального пути, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Эффективность и скорость работы многих из них зачастую зависит от характера препятствий, которые необходимо учитывать при расчёте траектории.

В данной статье не ставится цель проведения сравнительного анализа между различными алгоритмами, различные алгоритмы рассматриваются здесь для того, чтобы показать возможность реализации подхода, который будет более подробно изложен далее. Как было указано выше, эффективность работы различных алгоритмов зависит от характера карты препятствий, как входного параметра работы алгоритма. Будем считать, что эта карта определяется изображением с планом объекта, на которой отражены все препятствия. Тогда можно считать, что карты препятствий для объектов, у которых изображения планов будут схожи по какому-либо признаку (этот критерий будет рассмотрен более подробно в следующих разделах) будут так же близки. Следовательно, на таких объектах будут наиболее эффективно работать одни и те же алгоритмы построения пути. Таким образом, если сформировать набор данных, который будет включать в себя изображения планов различных объектов и соответствующую им эффективность работы различных алгоритмов, в дальнейшем можно выбирать на основе этого набора данных наиболее эффективный алгоритм для произвольного изображения плана объекта, сравнивая произвольное изображения с изображениями из набора данных и находя наилучшее совпадение, затем использовать значения эффективности работы алгоритмов для изображения из набора.

В данном разделе мы сформулировали проблематику и основные задачи, которые будут рассмотрены в данной статье. Далее, в разделе II мы рассмотрим задачу преобразования изображения с планом объекта в карту препятствий, в разделе III будет приведен краткий обзор алгоритмов поиска пути и результаты работы различных алгоритмов для нескольких видов помещений, в разделе IV будет более подробно описана процедура сравнения изображений планов различных объектов, в разделе V будут подведены итоги и сделаны заключительные выводы.

II. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В КАРТУ ПРЕПЯТСТВИЙ

Изображение плана объекта представляет собой массив значений RGB для цветных изображений, либо оттенков серого для монохромных. Существует множество библиотек, реализующих все основные функции работы с изображениями, мы воспользуемся одной из самых популярных – OpenCV [4] для языка программирования Python.

На первом этапе обработки изображения с планом объекта нам необходимо загрузить изображение, функция загрузки, предоставляемая библиотекой, поддерживает входной параметр в виде флага, которой позволяет загружать любое изображения в градациях серого цвета. Наша основная задача на данном этапе заключается в том, чтобы определить координаты всех препятствий на плане. Препятствия обозначаются оттенками более серого цвета на плане, места доступные для перемещения – более светлыми оттенками и белым цветом. Для решения задачи определения препятствий более удобно работать с так называемым бинарным изображением, то есть таким изображением, в котором каждый пиксель может представлять собой только один из двух цветов – белый или черный. Чтобы получить такое изображение из нашего исходного необходимо выполнить над ним процедуру, называемую бинаризацией. Один из самых популярных алгоритмов для решения этой задачи – так называемый метод Оцу [5], который позволяет эффективно преобразовывать даже изображения с относительно высоким уровнем «шумов» (актуально для отсканированных планов зданий), за счет разделения пикселей на классы «фоновых» и «полезных». В основе метода лежит идея о том, что минимизация дисперсии внутри класса равносильна максимизации дисперсии между классами, что выражается в виде:

$$\sigma_b^2(t) = \sigma^2 - \sigma_w^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2,$$

где веса ω_i — это вероятности двух классов, разделённых порогом t ,

σ_i^2 - дисперсия этих классов,

μ_i - среднее арифметическое для заданного класса.

Как отмечалось выше, на выходе после преобразования Оцу мы получаем матрицу бинарных значений. Далее нам необходимо получить координаты всех пикселей, имеющих черный цвет (значение в матрицу равно нулю), так мы получим массив координат препятствий. Чтобы с массивом было удобно работать в дальнейшем в задаче построения пути, необходимо перевести его в Декартовы координаты. Дело в том, что стандартная индексация элементов для матрицы изображений начинается с левого верхнего угла изображения, а в декартовых координатах предполагается, что начало координат находится в левом нижнем углу. Как видно из постановки, чтобы достичь указанного результата достаточно инвертировать все значение по оси y .

III. АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ПУТИ

На сегодняшний день разработано большое число алгоритмов поиска и построения оптимального пути для роботов. В данной работе мы будем использовать несколько алгоритмов, в основе которых лежит принцип поиска кратчайшего пути в графе. *Алгоритм Дейкстры*. Один из самых простых и широко

известных алгоритмов поиска кратчайшего пути в графе [6]. Он основывается на построении дерева кратчайших путей от начальной вершины до всех остальных вершин графа. Сложность работы алгоритма составляет $O(n^2)$. Основной цикл выполняется порядка n раз, в каждом из них нахождение минимума тратится порядка n операций. На циклы по соседям каждой посещаемой вершины тратится количество операций, пропорциональное количеству рёбер m (поскольку каждое ребро встречается в этих циклах ровно дважды и требует константное число операций). Таким образом, общее время работы алгоритма $O(n(2 + m)O(n^2 + m))$, но, так как $m \leq n(n - 1)$, оно составляет $O(n^2)$.

После завершения алгоритма Дейкстры, расстояние от начальной вершины до каждой другой вершины будет определено, а также будет построен кратчайший путь от начальной вершины до каждой другой вершины.

Однако, стоит отметить, что алгоритм Дейкстры не будет работать должным образом в графах с отрицательными весами ребер, так как может возникнуть проблема отрицательного цикла.

Алгоритм поиска A*. Еще один широко используемый алгоритм, используемый для поиска пути [7]. Он комбинирует алгоритм Дейкстры с эвристической функцией, которая оценивает расстояние от текущей позиции до конечной. Это оптимизирует поиск пути относительно алгоритма Дейкстры. Эвристическая функция, определяющая порядок обхода вершин, представляет собой «расстояние + стоимость» (обычно обозначаемой как $f(x)$). Эта функция — сумма двух других: функции стоимости достижения рассматриваемой вершины (x) из начальной (обычно обозначается как $g(x)$ и может быть, как эвристической, так и нет), и функции эвристической оценки расстояния от рассматриваемой вершины к конечной (обозначается как $h(x)$). Функция $h(x)$ должна быть допустимой эвристической оценкой, то есть не должна переоценивать расстояния к целевой вершине. Например, для задачи маршрутизации $h(x)$ может представлять собой расстояние до цели по прямой линии, так как это физически наименьшее возможное расстояние между двумя точками.

Алгоритм поиска D*. Алгоритм D* представляет собой улучшенную версию алгоритма A* для поиска пути в графе [8]. Он позволяет эффективно реагировать на изменения в графе или препятствия на пути. Основная идея алгоритма D* заключается в том, чтобы пересчитывать путь только в тех областях графа, которые были изменены или затронуты каким-либо образом. Это позволяет существенно сократить количество операций поиска пути и повысить эффективность алгоритма.

Основное отличие алгоритма D* от A* заключается в том, что после обновления стоимости вершины, мы также обновляем стоимость всех вершин, которые были достигнуты по предыдущему пути. Это позволяет алгоритму реагировать на изменения в графе и находить новый оптимальный путь. Алгоритм D* является очень эффективным для поиска пути в динамических средах, где граф может изменяться со временем. Он также может быть использован для поиска пути в реальном времени, так как он позволяет быстро обновлять путь при изменении условий.

В рамках данной работы был разработан программный код, который на первом этапе оцифровывает

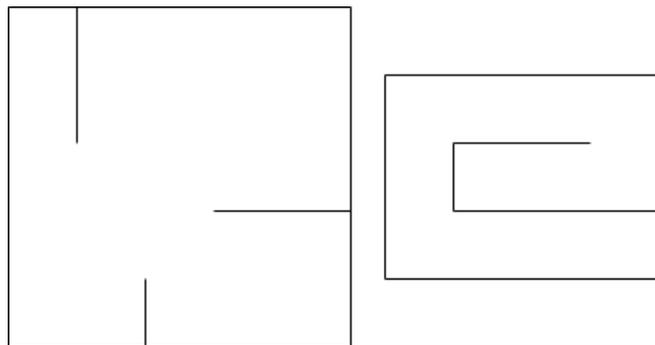


Рисунок 1. Схемы помещений

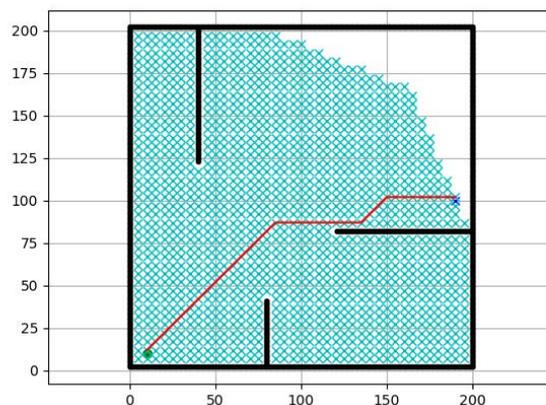


Рисунок 2 Построение пути алгоритмом Дейкстры для помещения 1 (11027 мс, стартовая точка [10,10] цель [180, 100])

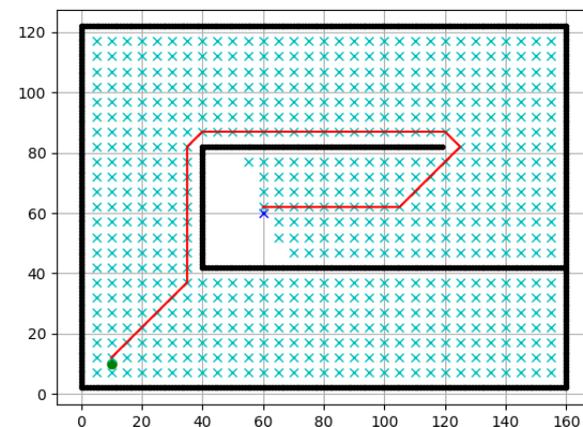


Рисунок 3 Построение пути алгоритмом Дейкстры для помещения 2 (4882 мс, стартовая точка [10,10] цель [60, 60])

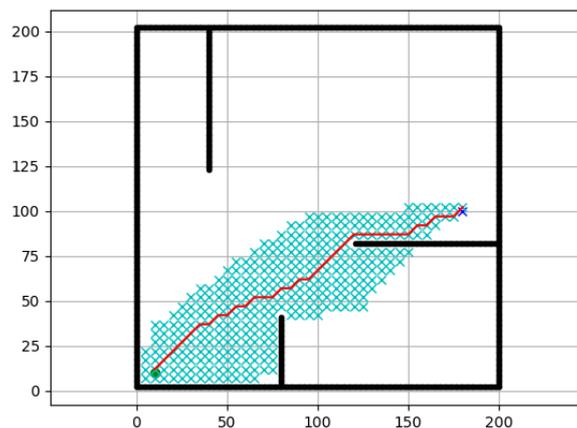


Рисунок 4 Построение пути алгоритмом A* для помещения 1 (2333 мс, стартовая точка [10,10] цель [180, 100])¹⁵

компоненты и анализирует их схожесть [10]. Он может быть использован для выявления различий в текстуре или структуре изображений.

В будущих работах предполагается проведение экспериментов, проверяющих работоспособность метода выбора оптимального алгоритма построения пути описанным в данном разделе методом. В частности, будет подготовлен набор данных с изображениями и оцененными для них эффективностями работы различных алгоритмов. Изображения из набора данных будут сравниваться и произвольными изображениями с использованием приведённых выше методов сравнения изображений, на основании сравнения будет выбран наиболее оптимальный алгоритм. Затем, будет выполнен непосредственный расчёт для произвольного изображения эффективности построения пути различными алгоритмами, после сравнения результатов вновь будет определен оптимальный алгоритм построения пути. Если результаты определения алгоритма двумя различными методами совпадут, можно будет говорить об эффективности предложенного ранее подхода. Так же необходимо будет принять во внимание, на сколько быстрее выполняется процедура сравнения двух изображений относительно процедур непосредственного расчёта пути для произвольного изображения. На основе этого можно будет сформулировать критерии целесообразности применения данного подхода.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Востребованной является задача автоматизации процессов работы на объектах атомной промышленности с повышенным радиационным фоном. Одним из видов таких работ является проведение радиационных обследований. Одним из вариантов автоматизации такого процесса является использование мобильных измерительных комплексов. В связи со спецификой подобных объектов, на их территории может отсутствовать покрытие беспроводным сигналом. В таких условиях робот не может управляться дистанционно, а должен работать полностью автономно, в частности, использовать датчики для контроля окружающей среды и следовать по заранее подготовленному на основе плана помещения заданию. Для формирования такого задания необходима работа алгоритма формирования пути, учитывающего объезд препятствий. Для формирования карты препятствий можно использовать изображения плана объекта, применив к нему современные подходы обработки изображений, в частности бинаризацию, для решения данной конкретной задачи наиболее подходящим, по мнению авторов статьи, является метод Оцу. Так же в рамках данной статьи был предложен метод, с помощью которого можно подобрать наиболее эффективный алгоритм построения пути на основе заранее подготовленного набора данных с использованием актуальных методов сравнения изображений планов объектов. В дальнейшей предполагается развитие описанных в данной работе гипотез и проведение экспериментов для их проверки.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Жабицкий М.Г., Донецкий С.Ю., Проблема разработки роботизированных комплексов для проведения радиационных измерений на промышленных объектах, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307–8162 vol. 11, no.7, 2023
2. Жабицкий М.Г., Черненко К.В., Метод цифрового определения координат измерительного комплекса при выполнении измерений в замкнутом помещении, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307–8162 vol. 11, no.6, 2023
3. Мочкин К.А., Жабицкий М.Г., Черненко К.В., Лагутина Е.С., Свердлик Г.В., Концепция системы цифрового сканирования насыщенных оборудованием помещений в целях реверсивного проектирования для образовательных проектов и стартапов, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307–8162 vol. 10, no. 8, 2022
4. OpenCV <https://opencv.org>
5. Otsu N., A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. : journal. — 1979. — Vol. 9. — P. 62—66.
6. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik / F. Brezzi — Springer Science+Business Media, 1959. — Vol. 1, Iss. 1. — P. 269—271. — ISSN 0029-599X
7. Hart P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4. — 1968. — № 2. — С. 100 — 107.
8. Энтони Стенц (1994). Оптимальное и эффективное планирование пути для частично известных сред. *Материалы Международной конференции по робототехнике и автоматизации*: 3310—3317. CiteSeerX 10.1.1.15.3683.
9. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity", IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, p. 600–612, Apr. 2004.
10. Addison P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook. — IOP, 2002.

Development of an algorithm for constructing the optimal path based on the floor plan for the measuring robot

Y.A. Andrienko, S.U. Donetskii

Abstract—*The current level of development of robotics allows the use of robots to perform many tasks. A separate class of tasks is work in conditions that pose a danger to human life and health, in particular, work at nuclear facilities with an increased background radiation. Often at such facilities there are problems with coverage of the entire area of the facility with a wireless communication signal. In such a situation, remote control circuits for the measuring robot become unavailable. One of the options for controlling the robot in such conditions is an autonomous mode of operation according to a task prepared in advance based on the plan of the object. This global task can be represented as a set of simpler subtasks, some of which will be considered in this article, in particular - digitizing an image with a floor plan and converting it into a coordinate array of obstacles; building a path from the starting point to the end point, taking into account obstacles; selection of the optimal algorithm for constructing a path based on the type of floor plan. When digitizing, the original grayscale image is initially loaded, which is then binarized using the Otsu algorithm, the resulting image is then converted into an array of obstacle coordinates. Three different algorithms are used to build the path - Dijkstra's algorithm, A* search algorithm and D* search algorithm. Using each algorithm, the path is calculated for several rooms. Next, we consider an implementation option for choosing the optimal path construction algorithm using machine learning methods to determine similar images. For each image in the pre-trained dataset, an optimal algorithm is known, which is also recommended to be used for an image that is determined to be "similar" to the corresponding image in the dataset.*

Keywords—*Path finding algorithms, robotic measuring systems, machine learning, digital image processing.*

REFERENCES

1. Zhabitskii M.G., Donetskii S.U., The problem of developing robotic systems for radiation measurements at industrial facilities, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 11, no.7, 2023
2. Zhabitsky M.G., Chernenko K.V., Method for digital determination of the coordinates of the measuring complex when performing measurements in a closed room, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 11, no.6, 2023
3. Mochkin K.A., Zhabitskii M.G., Chernenko K.V., Lagutina E.S., Sverdlik G.V., The concept of a digital scanning system for equipment-saturated premises of reverse engineering at educational projects and startups, International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 10, no. 8, 2022
4. OpenCV <https://opencv.org>
5. N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. : journal. — 1979. — Vol. 9. — P. 62—66.
6. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik / F. Brezzi — Springer Science+Business Media, 1959. — Vol. 1, Iss. 1. — P. 269—271. — ISSN 0029-599X
7. Hart P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4. — 1968. — № 2. — C. 100 — 107.
8. Anthony Stentz (1994). Optimal and efficient path planning for partially known environments. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation: 3310-3317. CiteSeerX 10.1.1.15.3683.
9. Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity", IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, p. 600–612, Apr. 2004.
10. Addison P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook. — IOP, 2002.