

УДК 004.942

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОРАБЕЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ТРАСС

*Гусак Е.В., Гурьев А.Т.**Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной думы, 17***USING A ROADMAP AS MODEL OF CABLE ROUTES ON THE SHIP***E.V. Gusak, A.T. Guryev**Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Russia, 163002, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Emb., 17***АННОТАЦИЯ:**

В статье рассматривается задача построения маршрутной сети кабельных трасс для прокладки маршрута кабеля. Разбираются все основные отраслевые ограничения, связанные с прокладкой кабельных трасс и монтажом кабеля и дается их классификация. Маршрутная сеть представляет собой связный ациклический граф, вершины которого стремятся к равномерному распределению между областями Вороного в евклидовом пространстве помещений судна. Приводится псевдокод алгоритма, который позволяет построить маршрутную сеть. Использование маршрутных сетей позволит повысить производительность задачи прокладки кабелей.

ABSTRACT

The article deals with the problem of building a roadmap of cable routes in the cable routing problem. All the main industrial technical standards associated with the laying of cable routes and cable installations are analyzed and classified. The roadmap is a connected acyclic graph with uniformly distributed vertices between the Voronoi regions in the Euclidean space of the ship's premises. The pseudocode of the algorithm is given, which allows building a roadmap. The use of roadmap will improve the performance in a particular implementation of cable routing problem.

Ключевые слова: маршрутные сети, графы, кабельные трассы, проектирование, математическое моделирование

Keywords: roadmap, graphs, cable routes, engineering design, mathematical modeling

Введение

В судостроении кабельные сети играют очень важную роль. Выход какого-либо кабеля из строя может обесточить весь объект, в том числе и критически важные судовые системы. Проектирование кабельных трасс является трудоемким процессом, потому что необходимо учитывать отраслевые требования к прокладке трассы и окружающие препятствия (коллизии). Сами процесс проектирования кабельных трасс можно разделить на непосредственное построение маршрутов кабельных трасс и заполнение полученных трасс кабелем, исходя из заложенного объема трассы. Если у трассы заполняется весь объем, то проектанту приходится возвращаться на предыдущий этап и строить дополнительно новые трассы или вносить изменения в уже существующие. Поэтому было бы лучше заранее заложить весь массив возможных маршрутов трасс, и далее прокладывать кабели по ним. Подобный массив должен быть избыточным, чтобы покрывать весь объем кабеля на судне. Далее мы опишем как можно применить методы планирования движения для построения маршрутной сети трасс с учетом ряда отраслевых ограничений на прокладку кабельных трасс.

Цель исследования

Целью исследования является разработка структуры маршрутной сети кабельных трасс,

удовлетворяющей всем основным требованиям к проектированию маршрутов кабельных трасс, для использования в алгоритме планирования движения.

Материал и методы исследования

Объектом исследования является процесс проектирования кабельных трасс. Предметом модели маршрутной сети кабельных трасс, построенная с помощью методов и средств планирования движения. Материалом исследования выступают различные отраслевые стандарты и Правила Морского регистра, регламентирующие процесс постройки судов в части проектирования кабельных трасс. В исследовании применяются системно-информационный анализ для анализа процесса проектирования и информационное моделирование для построения модели маршрутной сети.

Результаты исследования и их обсуждение

Проектирование маршрутов кабельных трасс на судах различного назначения в Российской практике отличается по своим особенностям от других отраслей промышленности, в первую очередь из-за необходимости следовать уникальному набору требований ГОСТов, ОСТов и Правил Морского регистра [1]. Основными документами, регламентирующими непосредственно проектирования маршрутов кабельных трасс, являются:

- КЛГИ.01285.00025 «Узлы соединения кабелей».
- КЛГИ.01285.00028 «Заземление».
- КЛГИ.01285.00029 «Уплотнение групповых проходов кабелей».
- КЛГИ.01285.00031 «Монтаж электрооборудования».
- КЛГИ.01285.00034 «Разделка, восстановление».
- КЛГИ.01285.00036 «Монтаж соединителей».
- КЛГИ.01285.00037 «Уплотнение индивидуальных проходов кабелей».
- КЛГИ.01285.00040 «Монтаж кабелей».
- Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 3 – Устройства, оборудование и снабжение.
- Правила по оборудованию морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 4 – Радиооборудование.
- Правила по оборудованию морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 5 – Навигационное оборудование.
- Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 6 – Противопожарная защита.
- Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 8 – Системы и трубопроводы.
- Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 9 – Механизмы.
- Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 11 – Электрическое оборудование.

– Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 15 – Автоматизация.

– Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть 17 – Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна.

При этом стоит отметить, что требования нормативных документов с кодом «КЛГИ» (означает, что данный документ разработан ЦНИИ СЭТ) ориентированы на судомонтажные работы во время постройки заказа и не все требования из них относятся к проектированию маршрутов кабелей, когда «Правила РМРС» содержат требования к техническим и эксплуатационным характеристикам судна, которые закладываются непосредственно при проектировании судна. При этом большая часть требований из данных нормативных документов пересекается друг с другом. Правила РМРС обеспечивают соблюдение стандартов безопасности мореплавания и предотвращения загрязнения окружающей среды.

Все описанные в данных стандартах требования можно разделить на детерминированные – вычисляемые на основе функций ограничения, которые выдают уникальный и предопределённый результат для заданных входных параметров и эвристические – чей результат нельзя вычислить точно или оптимально, но можно подобрать решение, которое будет максимально близким к оптимальному. В свою очередь ограничения делятся на глобальные – действующие постоянно на всем маршруте кабеля и локальные – действующие только при определенных условиях. В таблице 1 – приведена классификация ограничений по данным категориям.

Таблица 1

Классификация ограничений

Детерминированные		Эвристические (определение наиболее оптимального значения)	
Глобальные	Локальные	Глобальные	Локальные
натяжение кабеля; радиус изгиба; сечение кабеля/кабелей; ограничение на вес (кабеля, желоба, кожуха); расстояние между креплениями; прямолинейность трассы.	термо- и огнеустойчивость (допустимая температура); помехоустойчивость (экранирование кабеля); порог сопротивления кабеля; расстояние между кабелями; пересечение кабелей (угол пересечения кабелей);	расположение кабеля; доступность для ремонта; минимальная (или предельная) длина трассы; выход из строя в безопасную сторону.	запрет на прокладку кабелей в помещениях определенного типа; запрет на прокладку кабелей рядом с оборудованием определенного типа; возможность разсоединения кабеля; запрет на разсоединение кабелей; раздельная прокладка кабеля друг от друга (как отдельно на расстоянии, так и с помощью разделяющих устройств); специальные вводы (наконечники, оконцевание); ограничения на подключение; наличие специальных конструкций (петель, скоб, зажимов,

			огнезадерживающих констр-й, компенсационных устройств); запрет на прокладку кабеля в конструкциях определенного типа; защита от механических повреждений (специальная защита, фиксация кабелей); газонепроницаемость, устойчивость к агрессивной среде (специальные стальные трубки, каналы); водонепроницаемость; взрывозащищенность; защита кабеля (броня, оплетка, кожух); коррозионная устойчивость; уплотнение переборок (водонепроницаемых, газонепроницаемых, противопожарных и т.д.); заземление; резервирование (дублирование) кабелей.
--	--	--	---

Как видно из таблицы 1 только часть из требований можно отнести к классу сложности P , т.к. для них существует алгоритм с полиномиальным временем выполнения. К таким требованиям все детерминированные требования из таблицы, для которых имеются формулы, позволяющий получить однозначный результат из заданных входных параметров. Другую часть требований нельзя алгоритмизировать для получения 100% верного результата, т.к. подобный алгоритм будет иметь NP -сложность. Такой алгоритм будет принадлежать к категории оптимизационных или эвристических, поэтому если за недетерминированное полиномиальное время будет получен результат его работы, то он потребует проверки у человека-эксперта. Например, алгоритм проверки доступности трассы для ремонта предполагает размещение трассы в местах, куда человек сможет получить доступ путем частичного демонтажа перегородок, зашивок, кожухов и пр. конструкторских элементов, за которыми может скрываться трасса. Но критерий доступности трассы нельзя формализовать полностью, т.к. на вряд ли у алгоритма можно определить точную функцию оценки простоты демонтажа каждого конструкторского элемента, скрывающего трассу. Поэтому реализация «эвристических» («оптимизационных») требований в конечном алгоритме построения трассы потребует дополнительных входных параметров.

Кроме того, не все требования задействуются для построения маршрута кабельной трассы. Часть из требований учитывается только на следующем шаге прокладки кабелей по трассе. Далее будут описаны ограничения, которые задействуются для построения кабельных трасс.

Для успешной прокладки кабельной трассы во внутреннем пространстве судна необходимо определить с возможной моделью конфигурации

такого пространства. Обычно прокладка кабельных трасс в ручном режиме осуществляется на двумерных чертежах помещений, проектируемых на плоскости стены, пол или потолок помещения. Тем самым достигается положение прокладываемой трассы вдоль стен помещения со свободным доступом, за зашивкой или переборкой судной. На чертеже также отображаются «коллизии» – препятствия, расположенные на проекции определенной плоскости помещения, через которые нельзя прокладывать кабель. Это может быть размещенное там электрооборудование, вентиляционные трубы и другая техническая оснастка.

Проекция плоскости помещения является статической геометрической системой, т.к. каждый объект на чертеже имеет свои координаты и не изменяется с течением времени.

Таким образом, пространство проекции одной стороны помещения, по которой надо разместить кабельную трассу представляется следующим образом. Пусть у нас есть агент S , представляющий собой кабельную трассу, который надо провести в заданной области W со множеством коллизий $O \subset W$. Данная область представляет собой двумерное евклидово пространство $W \subset E^N$, $N = 2$. В евклидовом пространстве коллизии описываются как объекты $A \subset W$ разной сложной формы. Обычно на чертежах все объекты выполнены в форме прямоугольников. Объекты представлены в виде множества векторов $A\langle B, J \rangle$, где $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\} \subset W$ – множество точек, а $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ – множество ограничений, которые принимают значение «истина» или «ложь» в зависимости от предикатов $J_1(c)$, $J_2(c)$, ..., $J_3(c)$ и определяют положение объекта A в пространстве области через конфигурацию $c \in C_A$. Всего можно выделить несколько категорий таких конфигураций C :

Пространство допустимых состояний C_{free} – множество конфигураций объекта $c \in C_A$,

удовлетворяющих множеству ограничений J , при движении в котором исключено столкновение с коллизиями.

Пространство состояний коллизий C_{obj} – множество конфигураций объекта $c \in C_A$, удовлетворяющих множеству ограничений J , через которую нельзя осуществлять движение.

Стартовая конфигурация C_{init} – конфигурация точки начала движения агента S в пространстве допустимых состояний $C_{init} \in C_{free}$.

Целевая конфигурация C_{goal} – конфигурация целевой точки движения агента S в пространстве допустимых состояний $C_{init} \in C_{goal}$.

При таком описании модели проекции плоскости помещения, в котором необходимо провести трассу, есть несколько методов, которые могут быть использованы для генерации пула возможных маршрутов трассы:

Методы на основе пространственной декомпозиции – предполагает разбиение области на множество зон поменьше с помощью алгоритма декомпозиции. В дальнейшем задача построения маршрута сводится к определению смежности зон и построению графа связности. К сожалению данная категория методов требует значительных вычислительных ресурсов при декомпозиции пространства области и построении точного маршрута, особенно если область содержит множество объектов сложной формы. Это ограничение делает неприемлемым применение данного метода для построения маршрута трассы, т.к. необходимо декомпонировать проекции плоскостей помещений и ориентироваться в переходах между проекциями соседних помещений для прокладки трассы между помещениями, что в масштабах всего судна, где таких помещений может быть сотня, является ресурсоемкой задачей.

Методы потенциальных полей – метод, использующий физическую модель движения заряженной частицы в электростатическом поле. Препятствия области генерируют отталкивающие силы, а целевая точка маршрута – притягивающую. Первоначально разработан для навигации и обхода препятствий мобильными роботами в реальном времени. К сожалению, из-за использования в навигационной функции суммы притягивающих и отталкивающих потенциалов итоговый маршрут представляет собой кривую, что прямо противоречит требованию прямолинейной прокладки трассы с минимальным количеством ее поворотов.

Методы на основе маршрутных сетей – методы, основанные на использовании маршрутных сетей, представляющих собой граф. Данный граф формируется за счет совершения новых успешных попыток перемещения и содержит только бесконфликтные переходы и участки путей. Для построения кабельной трассы будет использоваться метод данного семейства, как наиболее совместимого с дополнительными эвристиками, накладываемыми предметной областью.

Как было сказано выше, маршрутная сеть представляет собой граф $G(V, E)$, где V – вершины, которые соответствуют бесконфликтным конфигурациям перемещений агента $S \subset C_{free}$, а E – ребра, которые соответствуют бесконфликтным переходам между вершинами V . Для построения маршрутной сети должны выполняться два условия [2]:

Маршрутная сеть должна быть достижима, т.е. для любой точки конфигурационного пространства $c \in C_{free}$ существует вершина маршрутной сети $s \in S$ и бесконфликтный путь к ней $\rho(\tau): [0,1] \rightarrow C_{free}$, $\rho(0) = c$, $\rho(1) = s$, где τ – момент времени. Условие позволяет соединить любую пару заданных точек свободного пространства с маршрутной сетью.

Маршрутная сеть должна быть связана, т.е. для любой пары точек конфигурационного пространства $C_{init}, C_{goal} \in C_{free}$, между которыми существует путь и найдены сопряженные вершины маршрутной сети $S_{init}, S_{goal} \in S$ также существует маршрут $\rho'(\tau): [0,1] \rightarrow S$, где $\rho'(0) = C_{init}$, $\rho'(1) = C_{goal}$. Данное условие обеспечивает навигацию по маршрутной сетке.

Данные условия обеспечивают гарантированное нахождение бесконфликтного маршрута между любыми двумя положениями объекта при условии, что он существует. Алгоритм, для нахождения такого маршрута, будет вероятно успешным при $\lim_{N \rightarrow \infty} P_{success} = 1$, где $P_{success}$ – вероятность найти бесконфликтный путь за N итерацию.

Наиболее подходящим алгоритмом для построения маршрутной сетки является алгоритм на основе быстро растущих случайных деревьев (Rapidly Exploring Random Tree). Изначально он был разработан для навигации в неголомных механических системах, но достаточно универсален для применения в геометрических системах [3, 4].

Данный алгоритм использует структуру связанного ациклического графа для дискретного представления конфигурационного пространства, что делает его использование удобным для нашей задачи. Корень данного графа соответствует исходному положению агента S . От этого корня в свою очередь строится дерево таким образом, чтобы разрешение получаемой маршрутной сети увеличивалось на всем пространстве допустимых конфигураций.

В алгоритме на каждой итерации выбирается случайная точка $c_{rand} \in C$, от которой ищется ближайшая вершина $c_{near} \in G$. Далее отрезок прямой $\rho' = [c_{near}, c_{rand}]$ проверяется на конфликтность. На данном отрезке определяется точка:

$$c_{new} = \begin{cases} c_{rand}, p' \in C_{free} \\ c_{stop}, p' \notin C_{free} \end{cases}, (1)$$

где c_{stop} – бесконфликтная конфигурация на данном отрезке удовлетворяющая условию $[c_{near}, c_{stop}] \in \rho' \cap C_{free}$ и $\|c_{stop}, C_{obs} \cap \rho'\| \leq \varepsilon$, где ε –

погрешность определения конфликтов. Точка c_{new} и ребро $[c_{near}, c_{new}]$ включаются в маршрутную сеть

при условии $c_{new} \neq c_{rand}$. На рисунке 1 представлен процесс построение маршрутной сети.

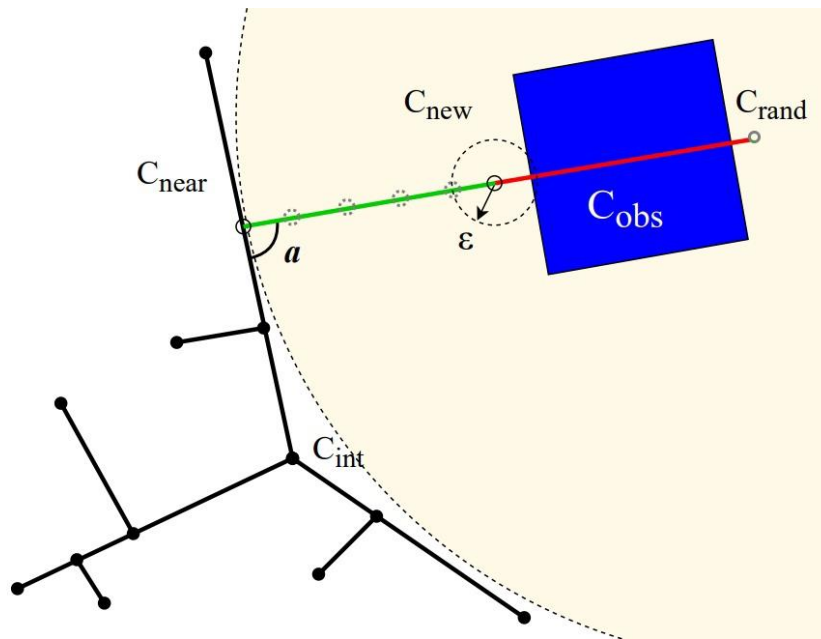


Рис. 1. Построение маршрутной сети

Для учета требований к прокладке трасс в алгоритм вводится дополнительная эвристика, которая корректирует функцию распределения вероятностей при выборе новых конфигураций таким образом, чтобы отдавать предпочтения путям наименьшей стоимости. Для этого вводится следующая оценка

$$m_{quality} = 1 - \frac{c_{vertex} - c_{opt}}{c_{optmax}}, \quad (2)$$

где c_{vertex} – суммарная стоимость пути из начальной конфигурации в данную вершину до целевой конфигурации, c_{opt} – предполагаемая стоимость оптимального пути из начальной конфигурации в целевую, c_{max} – максимальная стоимость пути до любой вершины дерева на текущем шаге. После вычисления оценки она сравнивается с нижним пределом вероятности выбора вершины дерева, которая прямо пропорциональна объему области Вороного, к которой она принадлежит, и между ними выбирается минимальная [5]. Стоимость определяется исходя из следующих компонентов оценки, основанных на требованиях к прокладке трассы:

допустимый угол изгиба трассы – острый угол между прямой ρ' и ребром графа $e \in E$, к которой принадлежит точка $c_{near} \in e$, должен стремиться к 90 градусам $\lim_{a \rightarrow \frac{\pi}{2}} \sin a = 1$, где a – радианная мера угла.

прямолинейность трассы – ребро $[c_{near}, c_{new}]$, проходящее рядом с объектом A , где $\vec{a} \in A$ – ближайший вектор этого объекта, определяемый через $d \rightarrow 0$ – минимальное расстояние между точкой c_{new} и вектором \vec{a} , должно быть коллинеарно ближайшему вектору этого объекта $\rho' \parallel \vec{a}$.

вместимость отрезка трассы должна быть как можно больше

$$V = \sum_{i=1}^n d_i^2 \rightarrow \infty, \quad (3)$$

где d – минимальное расстояние между точкой c_{new} и вектором \vec{a} , n – количество точек на отрезке ρ' и V – вместимость участка трассы.

соблюдение требования к углу поворота трассы, вычисляемое через тяговое усилие

$$T_j = (T_i \exp(K_t y_j) \leq [T_p]), \quad (4)$$

где y_j – угол поворота трассы в радианах, K_t – тяговое усилие на предыдущем прямолинейном участке трассы, T_j – прочность кабеля на i -ом прямолинейном участке трассы, T_p – допустимое усилие растяжения при затяжке кабелей

Тяговое усилие T_i вычисляется по формуле

$$T_i = pL_i(K_t \cos a_i + \sin a_i) + T_{j-1}, \quad (5)$$

где T_{j-1} – тяговое усилие в конце j -го криволинейного участка трассы, p – погонный вес кабеля, L_i – длина i -го прямолинейного участка трассы, K_t – коэффициент сопротивления от трения в ролягах или трубах, a_i – угол наклона i -го участка трассы к горизонту.

расстояние между креплениями трассы должно не превышать 2-ух метров $R_{bracing} \leq 2$ (т.е. через каждые 2 метра должна иметься возможность закрепить трассу к стене).

Маршрутная сеть «разрастается» в масштабе количества итераций N . Количество итераций рассчитывается как V_{free}/M , где V_{free} – свободная площадь помещений самого судна, M – масштаб маршрутной сетки. При этом стоит отметить, что алгоритм построен таким образом, чтобы

обеспечить равномерное разрастание дерева маршрутной сети, т.к. случайная вершина выбирается исходя из объема деформационного ретракта свободного пространства. В листинге 1 приведен псевдокод алгоритма построения маршрутной сетки с использованием RRT.

Произведем разбор основных функций алгоритма:

ОпределитьТочку() – определяет случайную точку c_{rand} в пространстве C_{free} .

ОпределитьБлижайшуюВершину(c_{rand}, G) – перебирает все вершины V в маршрутном графе G ,

вычисляя расстояние между c_{rand} и вершиной v с помощью функции измерения, и определяет ближайшую вершину.

НайтиВалиднуюКонфигурацию($c_{near}, c_{rand}, \varepsilon$) – выбирает новую конфигурацию точки c_{new} перемещаясь на инкрементное расстояние ε (погрешность определения конфликтов) от c_{near} к c_{rand} .

РассчитатьСтоимость(c) – вычисляет стоимость конфигурации точки c , исходя из компонентов оценки из требований к прокладке трассы.

```

RRT( $c_{init}, c_{free}, c_{opt}, N_{steps}, \varepsilon$ ):
 $G(V, E) \leftarrow (\{c_{init}\}, \emptyset)$ 
for  $i$  to  $N_{steps}$  do
    while ( $c_{opt}.стоимость > m_{quality}$ )
         $c_{rand} \leftarrow$  ОпределитьТочку()
         $c_{near} \leftarrow$  ОпределитьБлижайшуюВершину( $c_{rand}, G$ )
        РассчитатьСтоимость( $c_{near}$ )
         $m_{quality} \leftarrow 1 - \frac{c_{near}.стоимость - c_{opt}.стоимость}{c_{max}.стоимость - c_{opt}.стоимость}$ 
         $m_{quality} \leftarrow \min(m_{quality}, c_{free}.нижн\_предел)$ 
         $c_{new} \leftarrow$  НайтиВалиднуюКонфигурацию( $c_{near}, c_{rand}, \varepsilon$ )
        if ( $c_{near} \neq c_{new}$ )
             $G(V, E) = G(V \cup c_{new}, E \cup (c_{near}, c_{new}))$ 
            РассчитатьСтоимость( $c_{new}$ )
             $c_{max}.стоимость \leftarrow \max(c_{new}.стоимость, c_{max}.стоимость)$ 
return  $G(V, E)$ 

```

Листинг 1. Псевдокод алгоритма построения маршрутной сетки с использованием RRT

Производительность данного алгоритма нуждается в проверке, но разработанная структура может служить основой для конкретной реализации на программном языке.

Выводы

Процесс проектирования кабельных трасс в судостроении является трудоемким и нуждается в большей автоматизации. В данной статье мы произвели разбор основных требований из отраслевых стандартов к прокладке кабельных трасс на судах различного назначения и описали структуру маршрутной сети, представляющей собой массив возможных маршрутов трасс, и алгоритм ее построения. Маршрутная сеть может быть использована в дальнейшем для упрощения решения задачи прокладки маршрута кабеля, и повышения производительности ее работы за счет генерации маршрутной сети.

Список литературы

Гусак Е. В., Гурьев А. Т. Применение нейронных сетей для решения задачи трассировки кабелей в судостроении // Научно-технический и производственный журнал «Судостроение». 2022. №1(860). С. 67-71

Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды Института системного программирования РАН. 2016. № 4(28). С. 241-293.

LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. 2000. P. 293–308.

LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized Kinodynamic Planning. Int. J. Rob. Res. vol. 20. № 5. 2001. P. 378–400.

Urmson C., Simmons R. Approaches for heuristically biasing RRT growth. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. vol.2. 2003. P. 1178–1183