

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ В МОДЕЛИ МАРШРУТИЗАЦИИ СВЕРЛИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Хабаров С.П.

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: маршрутизация, сверлильные роботы, смена инструмента, оптимизация маршрута, библиотека OR-Tools, метрики расстояния.

Аннотация. Рассматривается задача планирования маршрутов для сверлильных роботов, выполняющих операции в фиксированных точках на обрабатываемых деталях. Основной акцент сделан на включении времени для смены инструмента, в процесс оптимизации маршрутов путем изменения матрицы расстояний. Обоснована важность выбора метрики расстояний (евклидовой или манхэттенской) в зависимости от особенностей привода робота.

INTEGRATION OF TECHNOLOGICAL CONSTRAINTS INTO ROUTING MODELS FOR DRILLING ROBOTS

Khabarov S.P.

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg

Keywords: routing, drilling robots, tool change, route optimization, OR-Tools library, distance metrics.

Abstract. The problem of route planning for drilling robots performing operations at fixed points on workpieces is considered. The main emphasis is placed on including the time for changing the tool in the route optimization process by changing the distance matrix. The importance of choosing the distance metric (Euclidean or Manhattan) depending on the features of the robot drive is substantiated.

Введение. Современные производственные процессы требуют высокой точности и скорости работы оборудования, включая сверлильные роботы. Эффективная маршрутизация операций сверления напрямую влияет на производительность и снижение энергопотребления. Однако стандартные алгоритмы маршрутизации редко учитывают время смены инструмента и тип привода, что приводит к субоптимальным решениям.

Предлагаемый подход интегрирует время смены инструмента в модель маршрутизации через модификацию матрицы расстояний. Это позволяет учитывать не только геометрическое расположение точек, но и временные затраты, связанные с технологическим процессом, что существенно улучшает качество маршрутов.

Постановка задачи. Задача маршрутизации сверлильного робота заключается в нахождении оптимального маршрута, минимизирующего общее время его работы. Исходными данными для решения поставленной задачи являются:

– набор отверстий $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$: каждое отверстие имеет координаты $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ и принадлежит группе G_k , которая соответствует определённому диаметру сверла;

- матрица расстояний $D = [D_{ij}]$, где D_{ij} – это расстояние между O_i и O_j , рассчитанное в евклидовой или манхэттенской метрики в зависимости от привода робота;
- время t_s – это фиксированное значение, характеризующее временные затраты на смену инструмента;
- скорость перемещения робота V_r измеряется в единицах расстояния за единицу времени;
- каждое сверло может быть связано с несколькими отверстиями, образующими группы $G_1, G_2, \dots, G_k$.

Требуется найти оптимальный маршрут, который минимизирует общее время работы, состоящее из времени перемещения между отверстиями и времени, затраченного на смену инструмента.

Метод решения. Для учета времени смены инструмента предлагается ввести в рассмотрение некое эквивалентное расстояние $d_d = t_s \cdot V_r$, а элементы матрицы модифицировать следующим образом:

$$D'_{ij} = \begin{cases} D_{ij}, & \text{если } i, j \in G_k, \\ D_{ij} + d_d, & \text{если } i \in G_k, j \in G_m, k \neq m. \end{cases}$$

Теоретическое обоснование данного подхода основывается на концепции использования весов для моделирования затрат на переход между вершинами. В данном контексте величина d_d интерпретируется как дополнительный вес, представляющий временные издержки, связанные с заменой инструмента. Такой подход общепринят в задачах маршрутизации, когда надо учитывать множественные параметры, влияющие на общую стоимость переходов [1].

При добавлении d_d модифицированная матрица расстояний D сохраняет ключевые метрические свойства, включая неотрицательность, симметричность и выполнение неравенства треугольника, что гарантирует корректность работы стандартных алгоритмов маршрутизации. Интеграция значения d_d в структуру задачи минимизирует необходимость модификации существующих алгоритмов оптимизации, сохраняя их эффективность.

Пример реализации. Рассмотрим пример, когда на плате размером 100x50 относительных единиц длины (о.е.) требуется просверлить 150 отверстий трёх различных диаметров. Для оценки степени влияния смены инструмента на длину маршрута предлагается использовать безразмерный коэффициент k , который будем интерпретировать как число условных проходов привода вдоль всей длины платы $(x_{\max} - x_{\min})$:

$$t_s \approx k \cdot t_{\text{проход}} = k \cdot \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{V_r}.$$

Это упрощает анализ и делает понятным влияние t_s на оптимизацию маршрута, связывая его с физическим процессом перемещения робота. Из рисунка 1 видно, что изменение k в диапазоне от 0 до 1 увеличивает длину маршрута с 900 до 1387 единиц длины, а количество смен инструмента падает со 106 до 3. При этом при $k > 0,6$ наблюдаются уже установившиеся значения.

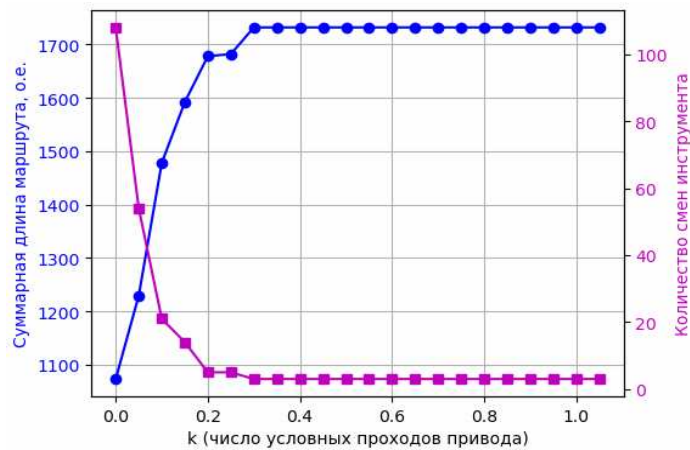
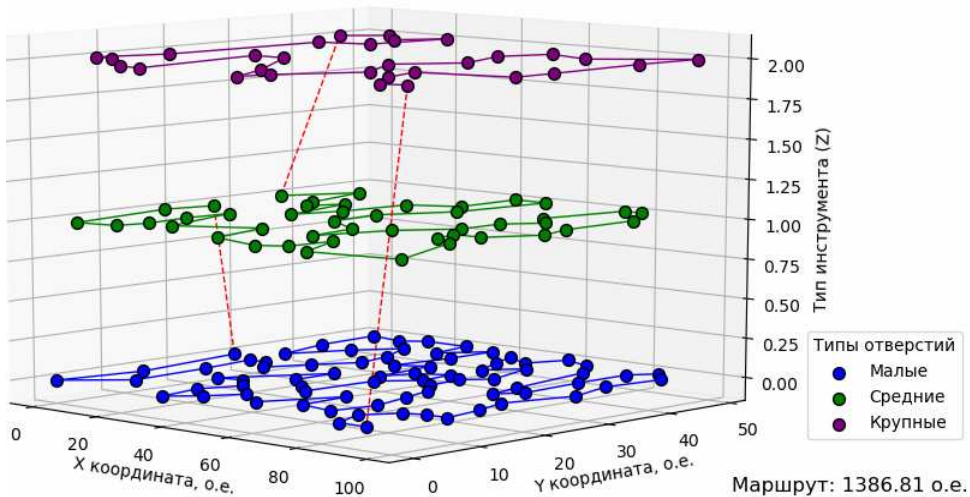


Рис. 1. Влияние времени смены инструмента на длину маршрута

Увеличение k ведёт к тому, что алгоритм будет минимизировать число смен инструментов, даже если это приведёт к увеличению длины маршрута. При малых k приоритет будет у минимального физического расстояния между точками (короткие маршруты, но больше смен инструментов). При больших k алгоритм начнёт объединять точки одной группы, чтобы минимизировать общее количество смен инструментов, несмотря на удлинение маршрута.


 Рис. 2. Оптимальный маршрут с учетом смены инструмента при $k = 1$

Оптимальный маршрут перемещения сверлильного робота по плоской плате представлен на рисунке 2 в виде трехмерной картинке. На ней явно видно три части оптимального маршрута, в каждый из которых алгоритм включил точки, которые обрабатываются одним и тем же инструментом.

Красным пунктиром на этом рисунке отмечены три ребра, на которых происходит смена инструмента. То есть алгоритм маршрутизации построил путь с минимально возможным числом смен оборудования. Однако этот же алгоритм, если считать, что смена инструмента происходит практически мгновенно, найдет абсолютно короткий маршрут, но с очень большим числом смен инструментов (рис. 3).

Надо отметить, что при решении задачи маршрутизации для сверлильных роботов важно учитывать особенности их приводов. Роботы могут быть оснащены различными типами приводов, которые влияют на их маневренность и способность перемещения по рабочей поверхности. Приводы с произвольным

направлением движения позволяют роботу перемещаться по любой траектории в рабочем пространстве. Такие роботы могут использовать евклидову метрику, поскольку они не ограничены в направлении движения и способны двигаться по оптимальному маршруту.

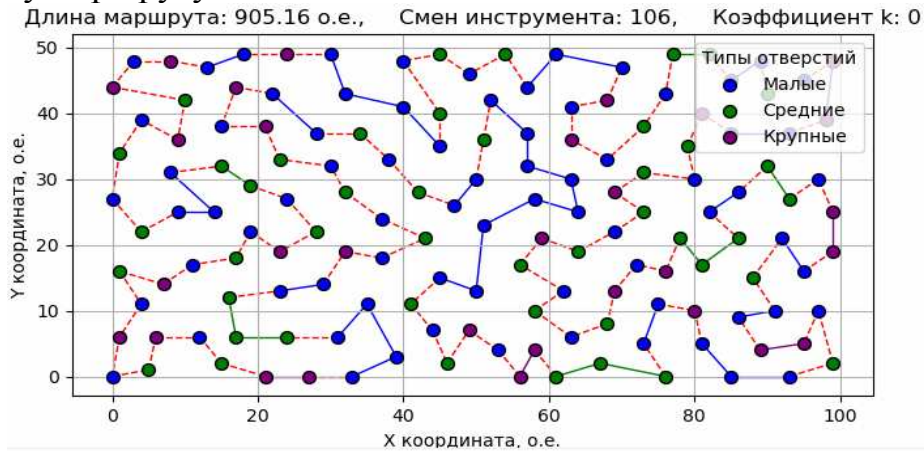


Рис. 3. Оптимальный маршрут без учета изменения матрицы D (при $k = 0$)

В большинстве современных сверлильных роботов и обрабатывающих центров движения происходят вдоль осей X и Y . Эти линейные движения часто используются для точных операций позиционирования. Управление по осям обычно выполняется с помощью сервоприводов или шаговых двигателей.

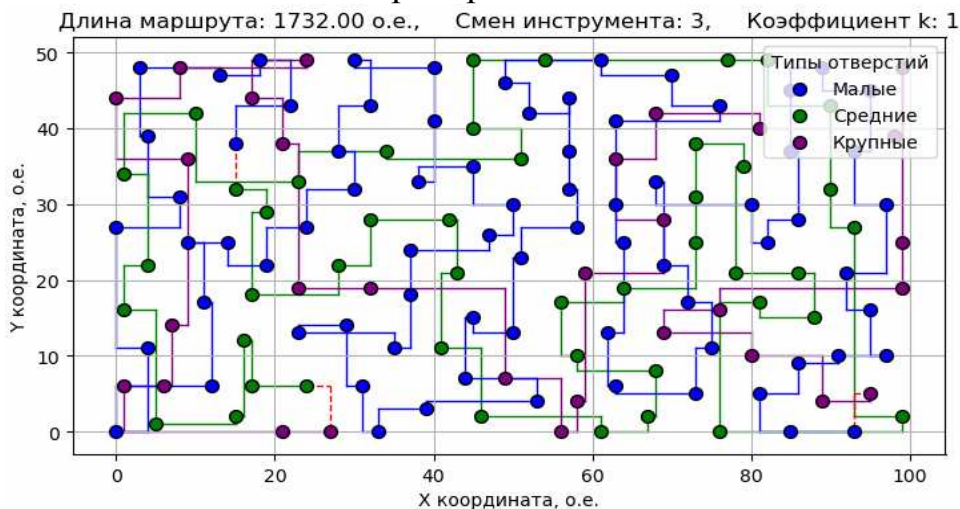


Рис. 4. Оптимальный маршрут при движении только по осям X и Y

Когда привод робота ограничивает движение только по осям X и Y , евклидова метрика становится неподходящей для моделирования реального движения, и следует использовать манхэттенскую метрику, которая более точно отражает движение робота:

$$D_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|.$$

Манхэттенская метрика учитывает, что робот может двигаться только по прямым линиям вдоль осей координат, и поэтому дает точную модель расстояния, которую необходимо преодолеть на каждом шаге. Результаты расчётов (рис. 4) показывают значительное увеличение длины маршрута: с 1387 до 1736 относительных единиц длины при трёх сменах инструментов. Характерной особенностью учета в модели d_d является получение в

оптимальных маршрутах явной группировки отверстий по диаметрам, как для случая евклидовой метрики, так и для случая манхэттенской метрики.

Алгоритмической основой для решения такого типа задач являются метаэвристические алгоритмы, такие как алгоритмы муравьиной колонии [2], генетические алгоритмы, которые эффективно находят приближённые решения при высокой вычислительной сложности. Специализированные алгоритмы для задач VRP и TSP с временными окнами также адаптируются для учёта ограничений, таких как время смены инструмента.

Для расчета приведенных в этой статье примеров была использована библиотека OR-Tools [3], которая предоставляет широкий набор инструментов для оптимизации маршрутов и поддерживает интеграцию с алгоритмами метаэвристики и точными методами. Ниже представлен фрагмент кода на python с использованием обращения к библиотеке OR-Tool:

```
def solve_routing(d, tool_types, dd, start_index, strategy):
    # Создание менеджера и маршрутизатора
    manager = pywrapcp.RoutingIndexManager(len(d), 1, start_index)
    routing = pywrapcp.RoutingModel(manager)
    # Функция стоимости, учитывающая смену инструмента
    def cost(from_index, to_index):
        from_node = manager.IndexToNode(from_index)
        to_node = manager.IndexToNode(to_index)
        distance = d[from_node][to_node]
        if tool_types[from_node] != tool_types[to_node]:
            distance += dd
        return distance
    # Регистрация функции стоимости
    callback_index = routing.RegisterTransitCallback(cost)
    routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(callback_index)
    # Параметры поиска
    search_parameters = pywrapcp.DefaultRoutingSearchParameters()
    search_parameters.first_solution_strategy = strategy
    # Решение
    solution = routing.SolveWithParameters(search_parameters)
    return solution, routing, manager
```

Этот же программный код был использован и при разработке маршрута сверлильного автомата для работы с одним из вариантов печатных плат (рис. 5).

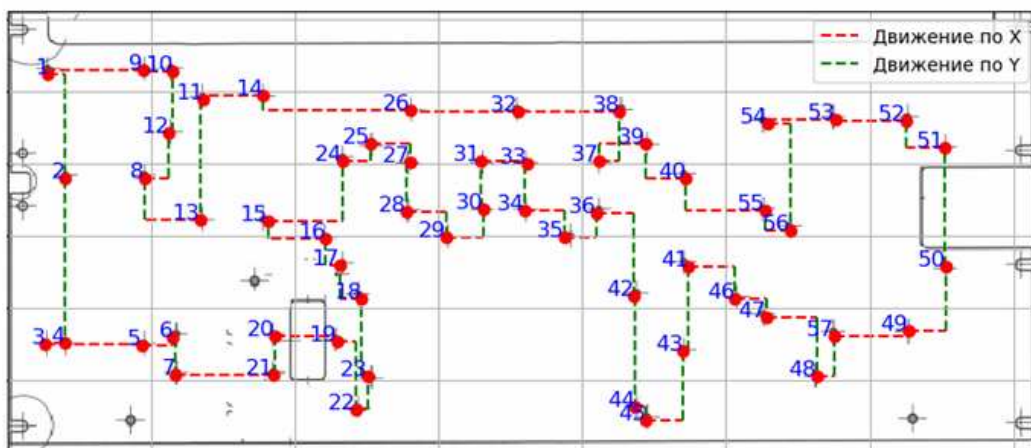


Рис. 5. Пример оптимизации маршрута для реальной платы

Надо отметить, что аналогичный алгоритмический подход может быть использован и в других областях [4, 5].

Выводы. В данной работе рассмотрена задача маршрутизации сверлильных роботов, выполняющих операции сверления в заранее определённых точках обрабатываемых деталей. Учет времени смены инструмента существенно влияет на оптимизацию производственного процесса, позволяя сократить общее время работы робота. Выбор метрики расстояния (евклидовой или манхэттенской) определяется типом привода робота и его способностью к перемещениям. Использование эквивалентного расстояния d_d , связанного с затратами времени на смену инструмента, позволило интегрировать дополнительные параметры в маршрутизацию без изменения основной структуры алгоритмов.

Список литературы

1. Хабаров С.П. Особенности реализации алгоритма муравьиной колонии для обобщённой задачи коммивояжёра // Рефлексия. – 2024. – № 5. – С. 15-20.
2. Хабаров С.П., Заяц А.М. Интеллектуальные системы и технологии. Роевые алгоритмы: инновационные подходы к оптимизации: учебное пособие / Под ред. Хабарова С.П. – СПб.: СПбГЛТУ, 2024. – 190 с.
3. Google OR-Tools [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developers.google.com/optimization>.
4. Коренев А.С., Скрыпка А.С., Хабаров С.П. Автономное судовождение на действующих судах // Морской вестник. – 2022. – № 1(81). – С. 92-95.
5. Хабаров С.П. Взаимодействия узлов сети по протоколу WebSocket // Информационные системы и технологии: теория и практика: Сборник научных трудов. Выпуск 9. – СПб: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2017. – С. 104-115.

Сведения об авторе:

Хабаров Сергей Петрович – к.т.н., доцент, с.н.с.