

УДК 512.5+519.1(075.8)

ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА: ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Т.А. Макаровских

Южно-Уральский государственный университет

Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76

E-mail: Makarovskikh.T.A@susu.ru

А.В. Панюков

Южно-Уральский государственный университет

Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76

E-mail: paniukovav@susu.ru

Е.А. Савицкий

ООО ИП «ВиПиАй Девелопмент Центр»

Республика Беларусь, 220012, Минск, пер. Калининградский, д. 8

E-mail: egor88@inbox.ru

Ключевые слова: раскройный план, гомеоморфный образ, вырезание, технологические ограничения, алгоритм маршрутизации, структуры данных.

Аннотация: Большинство исследований по траекториям инструмента для режущих машин в основном посвящены определению траектории при поконтурном вырезании. Современные ресурсосберегающие технологии резки листовых материалов позволяют совмещать контуры вырезаемых деталей, что позволяет уменьшить количество отходов материала и сократить длину резки. Однако, совмещение границ вырезаемых контуров является источником ряда ограничений, формализуемых в терминах плоских графов: (1) упорядоченное охватывание, (2) самонепересекающаяся траектория резания. В докладе рассмотрены основные структуры данных и алгоритмы, используемые в разрабатываемой САД/САМ системе технологической подготовки процессов раскроя, допускающей раскройный план с совмещёнными контурами и программное обеспечение, которое для решения задачи маршрутизации по раскройному плану строит гомеоморфный образ графа, решает данную задачу и интерпретирует результаты решения.

1. Введение

Лазерная резка является одной из основных современных технологий, используемых при обработке листового материала, что делает актуальной задачу определения траектории движения режущего инструмента. Задача определения траектории заключается в определении точной последовательности резов. Развитие автоматиза-

ции производства привело к появлению технологического оборудования с числовым программным управлением, используемого для резки листовых материалов. Новые технологии позволяют осуществлять вырезание по произвольной траектории с достаточной для практики точностью. Преимуществом при использовании лазерной резки является минимальность таких показателей как ширина реза и термические деформации. Целью задачи определения маршрута резки является поиск такого пути режущего инструмента, при котором выполняются условия предшествования, а время, затраченное на вырезание, минимально [1].

Основными ограничениями при лазерной резке является: (1) все элементы внутренних контуров должны быть вырезаны прежде, чем будут полностью пройден охватывающий их контур (ОЕ-охватывание [2]); (2) следует избегать пересечения траектории резки, касания допустимы (НОЕ-ограничение [1,3]); (3) в процессе лазерной резки происходит нагревание металлического листа, поэтому, необходимо учитывать термальные эффекты [4]; (4) ограничения на расположение точки врезки (построение РРОЕ-покрытия [5]); (5) общее время, требуемое на выполнение резки, представляющее суммарное время для осуществления всех вырезаний, времени на выполнение холостых переходов, времени на врезку и пр. желательно сокращать.

В [1] и [6] приводится классификация задач маршрутизации режущего инструмента и отмечается, что технологии ECP (Endpoint Cutting Problem) и ICP (Intermittent Cutting Problem) за счет возможности совмещения границ вырезаемых деталей позволяют сократить расход материала, длину резки и длину холостых проходов [1]. Проблемы уменьшения отходов материала и максимального совмещения фрагментов контуров вырезаемых деталей решаются на этапе составления раскройного плана.

Несмотря на очевидные преимущества технологий ECP и ICP, в настоящее время большинство отечественных [7–11] и зарубежных [1, 6, 12, 13] работ посвящено развитию технологии GTSP (General Travelling Salesman Problem), которая не предполагает совмещение контуров вырезаемых деталей.

Таким образом, при использовании данной технологии длина траектории будет равна сумме периметров всех контуров, а количество точек врезки – количеству контуров. Однако при этом проблема выполнения отмеченных выше условий предшествования оказывается тривиальной.

Для определения последовательности резки фрагментов раскройного плана не используется информация о форме детали, поэтому все кривые без самопересечений и соприкосновений на плоскости, представляющие форму деталей, интерпретируются в виде ребер графа, представляющего гомеоморфный образ раскройного плана, а все точки пересечений и соприкосновений представляются в виде вершин этого графа.

Гомеоморфным образом раскройного плана является плоский граф G с внешней гранью f_0 на плоскости S . Для любой части J графа G (т.е. $J \subseteq G$) обозначим через $\text{Int}(J)$ теоретико-множественное объединение его внутренних граней (объединение всех связных компонент $S \setminus J$, не содержащих внешней грани). Тогда $\text{Int}(J)$ можно интерпретировать как отрезанную от листа часть. Множества вершин, ребер и граней графа J будем обозначать через $V(J)$, $E(J)$ и $F(J)$ соответственно.

Топологическое представление плоского графа G на плоскости S с точностью до гомеоморфизма определяется заданием для каждого ребра $e \in E(G)$ следующих функций [2,3]: $v_k(e)$, $k = 1, 2$ – вершины, инцидентные ребру e , $l_k(e)$, $k = 1, 2$ – ребра, полученные вращением ребра e против часовой стрелки вокруг вершины $v_k(e)$, $r_k(e)$,

$k = 1, 2$ – ребра, полученные вращением ребра e по часовой стрелке вокруг вершины $v_k(e)$, $f_k(e)$ – грань, находящаяся справа при движении по ребру e от вершины $v_k(e)$ к вершине $v_{3-k}(e)$, $k = 1, 2$.

Таким образом, используя известные координаты прообразов вершин графа G и размещения фрагментов раскройного плана, являющихся прообразами ребер графа G , любой маршрут в графе G можно интерпретировать как траекторию режущего инструмента.

2. Представление исходных данных в программе

Как правило, раскройный план содержит большие группы однотипных деталей, а для описания размещения детали на раскройном плане достаточно указания величин (x, y, φ) , где (x, y) – координаты базовой точки этой детали (обычно это начало координат, к которым привязаны координаты остальных точек), φ – угол поворота детали вокруг ее базовой точки. Поэтому разумно иметь базу данных типовых деталей.

Основными примитивными элементами траекторий маршрута резки являются отрезки прямых и дуги окружностей. Целая окружность представляется как объединение двух дуг с центральными углами φ и $2\pi - \varphi$, $\varphi > 0$. Для такой идентификации примитивов достаточно указать координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) крайних точек v_1 и v_2 соответственно, а также $\tan(\varphi/4)$, где φ – центральный угол дуги (v_1, v_2) окружности, проходящей от точки v_1 до точки v_2 (очевидно, что для отрезка можно считать $\tan(\varphi/4) = 0$). С формальной точки плоская деталь представляет часть плоскости, ограниченной внешней границей и внутренними границами по числу дыр. Каждая граница представляет замкнутый контур, состоящий из такой последовательности примитивов, что начало следующего совпадает с концом предыдущего.

Для представления данных о детали используется формат JSON.

Структуры данных, используемые для представления гомеоморфного образа, должны включать всю необходимую информацию для эффективной работы алгоритмов маршрутизации и интерпретации построенных маршрутов [14]. Структура `Vert` содержит поля с указанием декартовых координат соответствующей точки на раскройном плане и ряд вспомогательных полей. Эти данные необходимы для интерпретатора маршрута и при заполнении полей структуры `Edge`. Поля структуры `Edge` содержат номера `v1`, `v2` инцидентных вершин, номера `f1`, `f2` инцидентных граней, номера `l1`, `l2`, `r1`, `r2` соседних в циклическом порядке ребер, значения `v1_ta4`, `v2_ta4` величины $\tan(\varphi/4)$, где φ – центральный угол дуг (v_1, v_2) и (v_2, v_1) соответственно, а также вспомогательные величины. Контейнеры для приведенных структур, другие вспомогательные данные и все используемые методы их заполнения инкапсулированы в класс `DataHolder` [14].

3. Маршрутизация в связных графах

Использование плоского графа в качестве гомеоморфного образа модели режущего плана позволяет формализовать технологические ограничения на порядок вырезания фрагментов плана резки. Граф G содержит все возможные элементы траектории инструмента, тогда возникает следующая задача построения маршрутов,

удовлетворяющих технологическим ограничениям: условие упорядоченного охвата (ОЕ-маршруты) [2] и определение траектории вырезания без самопересечений (НОЕ-маршруты) [3].

Определение ОЕ-покрытия полностью конструктивно, доказательством этого факта является эффективность алгоритмов, рассмотренных в [2]. Если связный граф G не является эйлеровым, то он содержит вершины нечетной степени. В этом случае ОЕ-маршрут состоит из k непересекающихся цепей. Задача построения такого маршрута решается алгоритмом ОЕ-Router [15]. Если плоский граф G , представляющий образ раскройного плана, не содержит мостов (т. е. ребер инцидентных одной грани), то возможно построить ОЕ-маршрут, в котором ребра произвольного паросочетания M и только они соответствуют холостым движениям. Отметим, что связанные плоские графы, являющиеся образами раскройных планов, не содержат мостов. Поэтому, если M является кратчайшим паросочетанием, то алгоритм М-ОЕ-Router строит маршрут с минимальной длиной холостых переходов. Задача построения такого маршрута может быть решена алгоритмом М-ОЕ-Router.

Итак, если граф G , представляющий гомеоморфный образ раскройного плана, связан и не содержит мостов, то алгоритм М-ОЕ-Router точно решает задачу, но требует определения кратчайшего паросочетания. Алгоритм ОЕ-Router решает задачу для любого графа G , но, как известно, жадная стратегия выбора холостого хода является только 2-оптимальной. Перечень алгоритмов построения ОЕ-маршрутов для связных графов приведен в таблице 1.

Таблица 1. Алгоритмы построения ОЕ-маршрутов

Тип маршрута	Вычислительная сложность
Eulerian ОЕ-cycle (рекурсивный алгоритм) [2]	$O(V ^2)$
Eulerian ОЕ-cycle (alg. ОЕ-Cycle) [2]	$O(E \cdot \log_2 V)$
ОЕ-Postman Route (alg. CPP_ОЕ)	$O(E \cdot V)$
ОЕ-Cover [15]	$O(E \cdot \log_2 V)$
Optimal ОЕ-Cover [2]	$O(V ^2)$

4. Маршрутизация для несвязных графов

Часто раскройный план содержит детали с отверстиями, а также другие детали, расположенные в этих отверстиях и т.д. Плоский граф, представляющий гомеоморфный образ такого плана резки, оказывается несвязным.

Для построения ОЕ-покрытия в несвязанном графе можно использовать следующие подходы: 1) определение допустимого обхода компонентов; 2) получение связного графа с использованием дополнительных ребер.

Первый подход позволяет получить очевидный алгоритм получения ОЕ-маршрута несвязанного графа. Основная идея этого алгоритма заключается в построении ОЕ-маршрутов для каждого компонента отдельно по его рангу (в порядке уменьшения рангов компонентов).

В этом случае решение проблемы маршрутизации может быть получено для каждого компонента с использованием методов из предыдущего раздела, что позволяет получить ОЕ-маршрут для графа.

5. Заключение

Технология, допускающая совмещение границ вырезаемых деталей – современная ресурсосберегающая технология резки. Существует несколько алгоритмов ее реализации. В настоящее время актуален вопрос эффективной программной реализации указанных алгоритмов. В докладе представлены результаты авторов, использованные при разработке функциональных элементов комплекса программ автоматизированной системы технологической подготовки процессов раскроя листового материала.

Список литературы

1. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. A Review of Cutting Path Algorithms for Laser Cutters // *International Journal Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 87. P. 1865–1884. DOI: 10.1007/s00170-016-8609-1
2. Makarovskikh T.A., Panyukov A.V., Savitsky E.A. Mathematical Models and Routing Algorithms for CAD Technological Preparation of Cutting Processes // *Automation and Remote Control*, 2017, Vol. 78, No. 4. P. 868–882.
3. Makarovskikh T., Panyukov A. The Cutter Trajectory Avoiding Intersections of Cuts // *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 2284–2289.
4. Li X., Liu Zh., Wang F., Yi B., Song Y. Combining physical shell mapping and reverse-compensation optimisation for spiral machining of free-form surfaces // *International Journal of Production Research*. 2018. DOI: 10.1080/00207543.2018.1512763
5. Makarovskikh T., Panyukov A. Development of routing methods for cutting out details // *CEUR Workshop Proceedings*. 2018, Vol. 2098. P. 249–263.
6. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D., Laguna M., Vossen T. An Improvement Heuristic Framework for the Laser Cutting Tool Path Problem // *International Journal of Production Research*. 2015. Vol. 53, No. 6. P. 1761–1776. DOI: 10.1080/00207543.2014.959268
7. Petunin A., Stylios C. Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49, No. 12. P. 23-28.
8. Petunin A., Chentsov A.G., Chentsov P.A. About routing in the sheet cutting // *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2017. Vol. 10, No. 3. P. 25-39. DOI: 10.14529/mmp170303
9. Chentsov A.G., Grigoryev A.M., Chentsov A.A. Solving a Routing Problem with the Aid of an Independent Computations Scheme // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 60-74.
10. Khachay M., Neznakhina K. Towards Tractability of the Euclidean Generalized Travelling Salesman Problem in Grid Clusters Defined by a Grid of Bounded Height // *Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 871. P. 68-77.
11. Chentsov A., Khachay M., Khachay D. Linear Time Algorithm for Precedence Constrained Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49, No. 12. P. 651-655.
12. Hoefl J., Palekar U. Heuristics for the Plate-cutting Travelling Salesman Problem // *IEE Transactions*. 1997. Vol. 29, No. 9. P. 719-731.
13. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. Construction heuristics for generating tool paths for laser cutters // *International Journal of Production Research*. 2014. Vol. 52, No. 20. P. 5965-5984.
14. Макаровских Т.А., Панюков А.В., Савицкий Е.А. Программное обеспечение для задачи построения траектории движения режущего инструмента // *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2018)*. Труды XVIII международной молодежной конференции. 2018. С. 172-176.
15. Makarovskikh T.A., Panyukov A.V., Savitskiy E.A. Mathematical models and routing algorithms for economical cutting tool paths // *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 56, No. 3. P. 1171–1188. DOI: 10.1080/00207543.2017.1401746