Using PCGTSP Algorithm for Solving Generalized Segment Continuous Cutting Problem

Alexander Petunin\*. Michael Khachay\*\*. Stanislav Ukolov\*. Pavel Chentsov\*\*

\*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia  
\*\*Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics, Ekaterinburg, Russia

**Abstract**: The problem of optimal tool routing for CNC sheet cutting machines, known as the Cutting Path Problem or Tool Path Problem is considered in one of the most general formulation of the Generalized Segment Continuous Cutting Problem (GSCCP). The heuristic algorithm developed by the authors and oriented to discrete optimization problems in the form of a generalized traveling salesman problem with order constraints (PCGTSP) is shown to be effectively applied to tackle this problem. This branch-and-bound algorithm, combined with the use of dynamic programming and a specialized heuristic solver, makes it possible to obtain optimal solutions for problems of small dimension in a relatively short time compared to known exact algorithms, as well as to find effective lower and upper bounds for the optimal solutions for large-scale problems. The conclusions are illustrated by solving several model examples.

*Keywords*: Cutting Path Problem, Optimization, Branch-and-Bound, Dynamic Programming, Generalized Traveling Salesman Problem, Precedence Constraints

1. INTRODUCTION

В качестве основной задачи в данной работе рассматривается проблема маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ, известная как Cutting Path Problem или Tool Path Problem [12]. Эта проблема возникает на этапе разработки управляющих программ для машины с ЧПУ, которые задают траекторию перемещения инструмента и ряд технологических команд, определяющих параметры резки листового материала для получения из него заготовок известных форм и размеров. Необходимые данные для моделирования маршрута инструмента машины с ЧПУ определяет информация о раскройных картах, которые разрабатываются на этапе проектирования раскроя и порождает задачу нерегулярного фигурного раскроя листового материала (проблему «нестинга») [13]. С точки зрения геометрической оптимизации эта проблема относится к классу задач раскроя-упаковки (Cutting & Packing) [16], для которых также, как и для маршрутных оптимизационных проблем, не известны алгоритмы решения полиномиальной сложности. Среди современных исследователей задачи Cutting Path Problem следует выделить R.Dewil иего коллег [12; 22; 23]. В этих работах делается попытка увязать особенности лазерной резки с алгоритмами маршрутизации. В [22] дан обзор алгоритмов маршрутизации, имеющих отношение к фигурной листовой резке на машинах с ЧПУ. Авторы классифицируют существующую литературу по маршрутизации на шесть классов задач: задача непрерывной резки (CCP), задача резки с конечным набором точек (ECP), задача прерывистой резки (ICP), задача обхода многоугольников (TPP), задача коммивояжера (TSP) и обобщенная задача коммивояжера (GTSP). Все перечисленные классы задач, кроме CCP, используют дискретные математические модели. Задача маршрутизации в общем случае резки может рассматриваться как ICP. Тем не менее, литература по ICP очень скудна, и в большистве научных статей ограничиваются решением задач других классов.

# 2. GSCCP MODEL Using PCGTSP Algorithm for Solving Cutting Path Problem

В [25] на базе введенных понятий «сегмент резки» и «базовый сегмент резки» удалось выделить в классе ICP достаточно широкий подкласс задач, которые сводятся к классам CCP и GTSP. Класс получил название Generalized Segment Continuous Cutting Problem (GSCCP). Эта концепция позволила, в частности, решать задачи разных классов, в которых возможно применение различных техник резки в рамках одного маршрута. Под сегментом резки здесь подразумевается траектория рабочего хода инструмента между точкой врезки и соответствующей ей точкой выключения инструмента, а базовый сегмент - часть сегмента резки без начальной части траектории между точкой врезки и точкой входа инструмента в контур, и конечной части между точкой выхода из контура и точкой выключения инструмента. Отметим, что задачи маршрутизации инструмента машин листовой резки предполагают наложение на условия задачи обязательных ограничений, т.н. условий предшествования, который вызваны технологическими особенностями листовой резки. Эти ограничения очень часто позволяют существенно снизить вычислительную сложность решаемой задачи. Для задач небольшой размерности возможно применение точных алгоритмов (см., например, [26]). В [27, 28] описаны новые алгоритмы, ориентированные на задачи дискретной оптимизации в форме обобщенной задачи коммивояжера с ограничениями порядка (PCGTSP). Эти алгоритмы основаны на методе ветвей и границ в сочетании с использованием аппарата динамического программирования и специализированного эвристического солвера PCGLNS. Первоначально предполагалось их использование для задач класса GTSP, однако разработанный специализированный конвертер позволил применять эти алгоритмы и для решения задач сегментной резки GSCCP. В следующем разделе на ряде модельных примеров будет показано, что новыеи алгоритмы позволяют получать оптимальные решения для задач небольшой размерности за сравнительно короткое в сравнении с алгоритмом DP время, а также находить эффективные нижние и верхние оценки оптимального решения для задач большой размерности.

*Тут бы что-то про алгоритмы*

# 3. NUMERICAL EXPERIMENTS

## 3.1. Experimental setup

For the purpose of evaluating algorithms performance, the special nesting plan was used, containing 19 plain parts and 24 contours, see Fig. 1. Position if 224 feasible pierce points are also depicted along the contours.



Figure 1. Original nesting plan.

To modify set of cutting segments for the nesting plan, two bridges were added, as seen at Fig. 2, yielding 17 parts bounded by 22 contours. Thus, two new complex parts appeared, marked with figures 1 and 2 at Fig. 2.



Figure 2. Position of two bridges

Further, another four bridges were created at the original nesting plan, see Fig. 3, yielding 15 parts and 20 contours. Three new complex parts are also marked with figures 1, 2, and 3, where part 1 is identical to that of Fig. 2, while part 2 is slightly bigger.



Figure 3. Position of four bridges.

All three instances were solved to optimality with two algorithms: DP (Dynamic programming) scheme, see Chentsov et al. (2018), which is proven to find optimal solution for problem instances below 33 contours; new problem-specific Branch-and-Bound algorithm, see. Khachay et al. (2021), pre-seeded with solution by PCGLNS heuristics, see Khachay et al. (2020).

Numerical experiments were conducted on the ordinary workstation with Intel Core i5 CPU at 1.60 GHz with 8 Gb of RAM.

## 3.2. Results

All the problem instances were successfully solved by both algorithms. Solution of original instance without bridges are on Fig. 4 for DP and Fig. 5 for B-n-B.



Figure 4. Solution of 24 contours instance with DP.



Figure 5. Solution of 24 contours instance with B-n-B.

Solutions of the second instance of 22 contours and 17 parts are on Fig. 6 and Fig. 7 respectively for DP and B-n-B algorithms. Note the two paths are almost identical in this case.



Figure 6. Solution of 22 contours instance with DP.



Figure 7. Solution of 22 contours instance with B-n-B.

And finally, solutions of smallest 20 contours instance are at Fig. 8 and Fig. 9. They look even more similar.



Figure 8. Solution of 20 contours instance with DP.



Figure 9. Solution of 20 contours instance with B-n-B.

All the solutions are summarized in Table 1. For each algorithm and problem instance time is specified in minutes and seconds. For DP solution length two values provided: air move length and full route length without contours, i.e., air move length with lead-in and lead-out. Estimated cutting time in seconds is also calculated. For B-n-B solution, two lengths are integer one (since current implementation of algorithms uses integer calculus) and its exact floating-point value.

Table 1. Solutions

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Problem instance** | | **DP** | | | | **B-n-B** | | |
| **#C** | **#P** | **Calc time (min:s)** | **Route (mm)** | **Cut time (s)** | **Calc time (s)** | | **Route (mm)** |
| 24 | 19 | 42:12 | 5340.12 5820.12 | 168 | 4.5 | | 5411 5411.16 |
| 22 | 17 | 4:01 | 5254.13 5634.13 | 133 | 4.1 | | 5380 5382.02 |
| 20 | 15 | 2:14 | 4709.12 5109.12 | 140 | 3.6 | | 4782 4786.55 |

## 3.3. Discussion

It can be easily seen, that both algorithms give solutions very similar to each other, both visually and numerically. The main reason for the slight difference in solutions is that DP algorithm due to its maturity considers the technological constraints of thermal cutting and distinguishes piercing points and tool off points, while B-n-B consider them as one point. This leads to slight decrease in air move length during optimization while simultaneously adding constant lead-in and lead-out distances to resulting toolpath.

Another reason for difference is that current implementation of PCGLNS and B-n-B algorithms uses integer arithmetic, so they often allow several optimal solutions with the same integer length. For example, during numerical experiments another solution for 22 contours case was obtained, slightly different from the one on the Fig. 7.

From the other hand, PCGLNS heuristic offers the great performance, giving high quality solutions in literally seconds. Even in case of hundreds of contours, high quality solutions can be obtained in minutes or tens of minutes, which make it useful in practical application, including development of control program for CNC cutting machines.

From that point of view, an idea of *Segment Cutting* seems very promising. Comparing 20 contours case against original 24 contours one we see not only 11% decrease of route length, but also lower (by 17%) number of piercing points. Both changes reduce time and cost of cutting process.

In contrast with lightning speed of obtaining solution, estimation of its lower bound is rather slow due to exponential time complexity. For example, solution at Fig. 9 (4782 mm) was proven to be optimal in almost 5 hours. This time can be improved both with parallel calculation as well as by reimplementing B-n-B algorithm using more performant programming language, C++for instance.

Таким образом, как видно из Таблицы 1, минимальное суммарное время резки достигается оптимальной маршрутизацией инструмента для набора сегментов, показанных на Рис.6., при этом оптимальная траектория для набора сегментов на рис. 4 получена почти в 10 раз быстрее, чем методом DP. Отметим также, что для всех 3-х подзадач задачи SGCCP (24, 22 и 20 сегментов резки) были получены доказанные оптимальные решения.

# REFERENCES

12. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. Sheet Metal Laser Cutting Tool Path Generation: Dealing with Overlooked Problem Aspects. т. 639. —Trans Tech Publications Ltd, 2015. — ISBN 978-3-03835-450-5. — DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.639.517.

13. Dowsland K. A., Dowsland W. B. Solution approaches to irregular nesting problems // European Journal of Operational Research. — 1995. — V. 84, No 3. — с. 506—521. — ISSN 0377-2217. — DOI: 10.1016/0377-2217(95)00019-M.

16. Alvarez-Vald ́es R., Carravilla M. A., Oliveira J. F. Cutting and Packing. // Handbook of Heuristics. — Berlin, Germany : Springer, 03.2018. —p. 931—998. — DOI: 10.1007/978-3-319-07153-4\_57-1.

22. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2016. — нояб. — т. 87, No 5. — с. 1865— 1884. — ISSN 1433-3015. — DOI: 10.1007/s00170-016-8609-1.

23. 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. — март. — т. 53, No 6. — p. 1761—1776. — ISSN 0020-7543. — DOI: 10.1080/00207543. 2014.959268.

25. Petunin A. General Model of Tool Path Problem for the CNC Sheet Cutting Machines // IFAC-PapersOnLine. — 2019. — v. 52, No 13. — p. 2662—2667. — ISSN 2405-8963. — DOI: 10.1016/j.ifacol. 2019.11.609.

26 Chentsov, A.G., Chentsov, P.A., Petunin, A.A., and Sesekin, A.N. (2018). Model of megalopolises in the tool path optimisation for CNC plate cutting machines. *International Journal of Production Research*, 56(14), 4819–4830. doi:10.1080/00207543.2017.1421784.

27 Khachay, M., Kudriavtsev, A., and Petunin, A. (2020). PCGLNS: A heuristic solver for the Precedence Constrained Generalized Traveling Salesman Problem. In N. Olenev, Y. Evtushenko, M. Khachay, and V. Malkova (eds.), *Optimization and Applications*, volume 12422 of *Lecture Notes in Computer Science*, 196–208. Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-030-62867-3 15.

28 Khachay, M., Ukolov, S., and Petunin, A. (2021). Problem-Specific Branch-and-Bound Algorithms for the Precedence Constrained Generalized Traveling Salesman Problem. In N. Olenev et al. (eds.), *Optimization and Applications*, volume 13078 of *Lecture Notes in Computer Science*, 136–148. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland. doi:10.1007/978-3-030-91059-4 10.

30 Salman, R., Ekstedt, F., and Damaschke, P. (2020). Branch-and-bound for the Precedence Constrained Generalized Traveling Salesman Problem. *Operations Research Letters*, 48(2), 163–166. doi:10.1016/j.orl.2020.01.009.