

物流の効率化のための実践的アルゴリズム

柳浦睦憲¹

¹ 名古屋大学大学院情報学研究科数理情報学専攻

概要

何台かの車両で顧客に荷物などを配達する際、どの車両がどの顧客をどの順に回るかを計画し、配達に伴う種々のコストの最小化を図るタイプの問題を総称して配送計画問題と呼ぶ。小口配送の需要の増加や物流業界における人材不足に伴い、配送計画に対する実践的な解法が注目されるようになってきた。配送計画には様々な問題があるが、その中で時間枠付きの問題や被覆制約付きの問題に対して取り組んできた効率的アルゴリズムの開発の試みを紹介する。

Practical Algorithms to Make Logistics Efficient

Mutsunori Yagiura¹

¹Department of Mathematical Informatics, Graduate School of Informatics, Nagoya University

Abstract

Vehicle routing and scheduling problems refer to those problems that aim to minimize various costs incurred in delivering parcels to customers by several vehicles. Due to the increase in delivery demands, as well as the shortage of personnel, more attention has been devoted to practical optimization algorithms for vehicle routing and scheduling problems. This paper introduces some of our attempts in devising efficient algorithms for the vehicle routing problem with time windows and the multi-vehicle covering tour problem.

1 はじめに

長距離輸送から宅配などの小口配送まで、物流には様々な階層があり、そのそれぞれにおいて船、飛行機、列車、トラックなどの貨物運送のための乗り物や人材などの資源をいかに有効に利用するかによって物流コストは大きく変わる。とくに最近では、インターネットを介した売買の増加に伴って小口配送の需要が急増するとともに物流業界における人材不足が深刻な問題として注目されている。小口配送に関する代表的な問題として、複数台の車両で多くの顧客に荷物などを配達する際、どの車両がどの顧客をどの順に回るかを計画し、配達に伴う種々のコストの最小化を図るタイプの種々の問題があり、これらを総称して配送計画問題と呼ぶ。

上述のような状況から配送計画の効率化に注目が

集まっているが、このような例をはじめとして多くの問題を組合せ最適化問題として定式化でき、最適化手法を用いることで実践的な改善策が得られる。しかし、現実に現れる組合せ最適化問題のほとんどがNP困難 [2] であるといっても過言ではなく、そのような問題に対しては、問題規模が大きくなると厳密な最適解を得ることは現実的ではない。このような問題に対して現実的な計算時間で良質の解を得る手法を総称して近似解法あるいは発見的解法と呼ぶ。

近似解法の基本戦略に欲張り法と局所探索法がある。欲張り法は局所的な評価に基づいて解を構築する構築型の解法、局所探索法は適当な初期解から始め、小さな修正によって解を改善する操作を可能な限り繰り返す反復改善型の手法である。計算機性能の向上に伴い、よほど問題規模が大きくない限りこれらの手法はごく短時間で計算できるようになった。

その結果より長い時間をかけてより良い解を得たいという要望が高まってきた。このような要望に応えるため、アニーリング法、遺伝アルゴリズム、タブー探索法などの様々な手法が提案されてきた。このような手法を総称してメタ戦略 (metaheuristics, メタヒューリスティクス, メタ解法) と呼ぶ [6]。物理現象や生物の進化の様子にアイデアを得た目新しい名前の手法が最適化に効果を発揮するという一方で、ネーミングの面白さもあって注目を浴びたこともあるが、このようなアイデアに基づいてアルゴリズムを設計することで実際に高性能なアルゴリズムが得られることから、現在では組合せ最適化問題に対する実践的解法を設計するために欠かせない方法論として広く利用されている。

本稿では、配送計画に関する幾つかの問題に対して、メタ戦略に基づいて実践的なアルゴリズムを開発した成果を手短に紹介する。

2 時間枠付き配送計画問題

配送計画問題において、各顧客が配達を希望する時刻に関する時間枠を指定し、その時間内に配達することが求められる問題を時間枠付き配送計画問題という。この問題において、顧客の時間枠に関する希望をより柔軟に表現できるよう、配達時刻に関する希望の度合いをペナルティ関数として表現し、そのような関数値の合計の最小化を目的関数に組み込んだ問題を考える。

このような問題を考える場合は、各車両の配達ルートにおいて顧客を訪問する順序を指定したとしても、各顧客に配達するタイミングを決めるために最適化問題を解く必要がある。これを以下では配達時刻最適化問題と呼ぶ。また、メタ戦略に基づいてアルゴリズムを構成する際には、その基礎となる局所探索が高速に動作するよう、近傍操作によって生成された新たなルート (近傍解) に対して、配達時刻最適化問題を高速に解くことによって近傍解の評価を効率化する工夫が必要となる。

簡単のためあるルートが顧客 $1, 2, \dots, n$ をこの順に配達するものとする。各顧客 i の配達時刻 s_i に関するペナルティ関数を $p_i(s_i)$ と記し、顧客 i に配達したのち顧客 $i+1$ に到着するまでに要する時間を t_i とすると、配達時刻最適化問題は、条件 $s_{i+1} \geq s_i + t_i$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$) の元で $\sum_{i=1}^n p_i(s_i)$ を最小化する問題である。

この問題に対して以下のような計算時間を実現す

るアルゴリズムを提案した。以下では関数 $p_i(\cdot)$ は区分線形関数であるとし、その区分数を δ_i と記す。また、ある車両 k のルートに含まれる顧客のペナルティ関数の区分数の総和を $\delta_k = \sum_{i \text{ in route } k} \delta_i$ 、全車両における δ_k の最大値を $\delta_{\max} = \max_k \delta_k$ とする。

- 関数 $p_i(\cdot)$ が一般の区分線形関数の場合 (非凸かつ不連続でも良い)。この場合は各車両 k に関する配達時刻最適化問題を $O(n\delta_k)$ 時間で解くことができ、また、代表的な近傍操作に対し、近傍解を 1 つあたり $O(\delta_{\max})$ 時間で評価できる。
- 関数 $p_i(\cdot)$ が凸の区分線形関数である場合。この場合は各車両 k に関する配達時刻最適化問題を $O(n \log \delta_k)$ 時間で解くことができ、また、代表的な近傍操作に対し、近傍解を 1 つあたり $O(\log \delta_{\max})$ 時間で評価できる。

これ以外にも、顧客間の移動時間が時刻に依存して変化する場合や、顧客間の移動時間がコストをかければ短縮できる場合など、様々なバリエーションに対して配達時刻最適化問題を高速に解く工夫を行った。それらの成果は文献 [3] にまとめてある。

3 被覆制約付き配送計画問題

被覆制約付き配送計画問題は、各顧客に対して駐車スペースの候補が複数ある場合など、より一般的な状況を考慮できる問題である。訪問することのできる点 (訪問点) の集合 V と被覆されなければならない点 (被覆点) の集合 W からなる無向グラフ $G = (V \cup W, E_1 \cup E_2)$ を定義する。ここで E_1 と E_2 は辺集合 $E_1 = V \times V$, $E_2 \subseteq V \times W$ であり、 E_1 の各辺にはコスト c_{ij} が付与されている。各被覆点 $w \in W$ を被覆するには、 $(v, w) \in E_2$ を満たす $v \in V$ の少なくとも 1 つに車両が訪問すればよい。デポを出発して V 内のいくつかの点を訪問し、再びデポに戻ってくるような複数のルートによって W の点すべてを被覆し、それらルートのコストの合計を最小化することが本問題の目的である。

たとえば郵便ポストの設置位置と郵便物の回収ルートを設計する際、各住宅からある程度近い位置に 1 つはポストがなければならず、郵便局は回収のための移動距離を最小にしたいとする。この問題は、ポストの設置位置候補の集合を V 、住宅の集合を W 、ポスト間の距離を c_{ij} 、位置の近い住宅とポストの間

に辺 E_2 の辺が存在すると考えることで、被覆制約付き配送計画問題として扱うことができる。

既存研究では、集合被覆問題を解いて訪問する点を定めたのち、配送計画問題に対する局所探索法を利用してルートを改善するものが多かった。しかしこのような探索では、訪問する点集合を変えることによってルートを改善する可能性を見過ごしてしまう。そこで、訪問点集合とルートを同時に探索する局所探索法を提案した。

提案手法の中では、配送計画問題によく用いられる近傍操作に加えて、1-del/1-ins という操作を用いている。これは、現在のルートから訪問点を一つ除去する 1-del、現在のルートに訪問点を一つ追加する 1-ins、これら 2 つを同時に行う 1-del-ins の 3 つの近傍操作からなる。このような操作によって改善が起こるための必要条件を用いて探索候補を絞り、局所探索を効率的に行うアイデアを提案した。

提案手法はまた、ルートの一部を一旦除去したのち最適に再構築する手法を組み込んでいる。この操作では、まず現在のルートの 1 つから点 s, t を選び、 s から t までの部分パスを除去する。そこで被覆されなくなった被覆点の集合を W' 、 W' の中の点を一つでも被覆する訪問点集合を V' とし、それらからなるグラフ $G' = (V' \cup W', E')$ を定義する。 s を始点とし、 V' 内のいくつかの頂点を訪問して t に到達するようなパスで、 W' の点をすべて被覆するものの中から、最小コストのパスを求める問題を解く。そして、得られたパスで元の部分パスを置き換えることによってルートを改善する。この部分問題を厳密に解くための動的計画法を提案した。

既存手法との比較実験により、計算時間と精度の両方において優れた結果を得ている [4, 5]。

4 おわりに

本稿では、配送計画タイプの問題の中から、時間枠付き配送計画問題、および被覆制約付き配送計画問題に対して、メタ戦略に基づいて実践的なアルゴリズムを開発した成果を手短に紹介した。この他にも、ゴミの収集やビルのメンテナンスのような周期的な集配送や巡回を考慮する問題についても一定の成果がある [1]。物流の現場は多様であるが、その効率化の一助となるようなアルゴリズムをひとつでも多く提供できれば幸いである。

謝辞

本稿で紹介した成果を含む配送計画に関する一連の結果は、茨木俊秀、久保幹雄、宇野毅明、野々部宏司、増田友泰、今堀慎治、祖父江謙介、橋本英樹、呉偉、胡艶楠、高田陽介、武内優太、董航の諸氏をはじめ、多くの方々との共同研究の成果である。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- [1] H. Dong, Y. Takada, W. Wu and M. Yagiura, A new model of the periodic vehicle routing problem with flexible delivery dates and its evaluation, *Proceedings of the International Symposium on Scheduling (ISS)*, pp. 114–121, 2019.
- [2] M.R. Garey and D.S. Johnson: *Computers and Intractability — A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W.H. Freeman and Company, 1979.
- [3] H. Hashimoto, M. Yagiura, S. Imahori and T. Ibaraki, Recent progress of local search in handling the time window constraints of the vehicle routing problem, *Annals of Operations Research*, 204 (2013) 171–187.
- [4] Y. Takada, Y. Hu, H. Hashimoto, M. Yagiura, An iterated local search algorithm for the multi-vehicle covering tour problem, *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2015.
- [5] Y. Takeuchi, Y. Takada, Y. Hu, H. Hashimoto and M. Yagiura, Efficient implementations of an iterated local search algorithm for the multi-vehicle covering tour problem, *Proceedings of the International Symposium on Scheduling (ISS)*, pp. 79–86, 2017.
- [6] 柳浦睦憲, 茨木俊秀, 組合せ最適化 — メタ戦略を中心として, 朝倉書店, 2001.

