

## 時間枠付き配送経路問題における局所探索の誘導方式

01013100 日本IBM 東京基礎研究所\* 岡野 裕之†

## 1 はじめに

時間枠付き配送経路問題 (VRPTW) は、1つの拠点を始点とする最も少ない経路(巡回路)で、いくつかの配送先を訪問する問題である。同じ経路数であれば、配送先での待ち時間を含む総経路長(所要時間)を最小にすることが求められる。

VRPTW は、実世界における物流によく見られる問題であるため、古典的な問題でありながら今でも注目を集めている。また VRPTW は NP 困難のため効率のよい厳密解法は存在せず、構築法によってよい近似解を得るのも困難であることから、局所探索に基いた近似解法が広く用いられている。

VRPTW の局所探索では通常、経路間で部分路を交換または移動するシフト・インターチェンジ近傍と、経路内の近傍である 2-opt や Or-opt 近傍が用いられる。ある配送先を基点とした時、経路長を短くする近傍が見つかる範囲を限定でき、そのような近傍の数はほぼ定数個である。さらに、近傍操作の適用可能性の検査(フィージビリティ・チェック)には  $O(1)$  アルゴリズムが知られているので、局所探索は比較的高速である。

しかし VRPTW は強い時間枠制約のために近傍が小さく、局所探索が悪い局所解に簡単に捕まってしまうため、局所解から脱出するように局所探索を誘導する方法が必要となる。誘導方式には、よい解周辺の探索に重点を置く方法(強化)と、解空間を広く渡り歩く方法(多様化)があるが、VRPTW において計算時間がある程度制限されている場合に、どちらにどの程度比重を置くのが適当かは明らかでない。そこで本稿では、各種誘導方式をベンチマーク・インスタンスを用いて比較する。

## 2 局所探索の誘導方式

代表例にタブー探索 (TS:tabu search)[1]がある。これは適用した近傍操作をある期間記憶しておき、後戻りを避けながら局所解から脱出する方法である。本稿では近傍操作で移動されたノードを長さ 10 のタブーリストに入れ、リストに入っている間それらのノードの移動を禁止する。TS はある程度強化の能力を有するが、多様化の機能が明示的に組み込まれていないことが指摘される。

同様の性質を示す技法に誘導局所探索 (GLS:guided local search)[2]がある。これは解の静的な特徴に重みを与える方法である。VRPTW においては、有向辺  $j$  に対して 0 に初期化したペナルティ・ベクタ  $p_j$  を持っておき、解を  $S$ 、有向辺のコストを  $c_j$  として、局所探索が参照する目的関数に  $\lambda \sum_{j \in S} p_j c_j$  を加える。局所解が含む  $c_j/(p_j + 1)$  が最大の有向辺  $j$  に対して  $p_j := p_j + 1$  のように値を更新することで局所解から脱出する。本稿では文献 [2] と同様に  $\lambda = 0.2$  を用いる。

さらに、得られたすべての局所解を記憶しておき、それらを組み合わせて脱出解を生成することで多様化を実現する方法 (RT:Rochat-Taillard)[3]がある。この方法では得られた局所解を解集合に入れておく。次に解集合から適当に選んだ経路を、空集合に初期化した解に加えてゆくことで脱出解を得る。このとき、組み立て中の脱出解と配送先が重なる経路は選択しない。解集合内のすべての経路を用いてもカバーできなかった配送先は、最近傍法によって新たな経路とする。

以上の3つの方式には、経路数最小化のための機能が明示的に組み込まれていないが、筆者らはその機能を有する局所探索の誘導方式を提案している。

## 3 経路数最小化のための誘導方式

局所探索が経路長を改善するのに対し、VRPTW で求められるのは経路数の最小化であり、これらの目的はしばしば相反する。したがって、経路数を最小化するための機能が局所探索とは別に必要である。

これに対し筆者らは、ペナルティをかける経路を次々に変えながら局所探索を実行する解法を提案している [4]。解の動的な特徴である経路に対して重みを与え、目的関数を修正するので、目的修正法 (OT:objective tuning) と呼んでいる。この方法は次のような手順である:

1. 経路集合  $Q_r$  に初期解が含む経路を入れる。
2.  $Q_r$  から経路を1つ取り出してペナルティを与える。(この経路を目的修正経路と呼ぶ。)
3. 空経路(未使用車両)にもペナルティを与える。
4. 局所探索を実行する。
5. 局所探索中に目的修正経路の近傍が空集合になったら空経路のペナルティを0にして探索を続ける。
6. 局所探索で最良解が更新された場合、初期解と同一でない(変化した)すべての経路を  $Q_r$  に挿入する。

\*〒 242-8502 神奈川県大和市下鶴間 1623-14

†E-mail: okanoh@jp.ibm.com

表 1: 結果解 (経路数/経路長) の平均と総反復回数 [350MHz マシンにおいて各問題で 3 分の実行時間制限]

問題クラス	Best	OT	OT+TS	OT+GLS	OT+RT	OT+TS+RT
C1	10/827.47	10/849.18	10/843.69	10/846.23	10/837.34	10/842.98
C2	3/589.72	3.13/691.44	3/670.26	3.13/692.49	3.13/620.99	3/639.92
R1	11.92/1194.72	13.42/1230.42	13.00/1254.86	13.50/1233.13	13.08/1220.47	13.17/1235.90
R2	2.82/951.92	3.27/1109.32	3.18/1104.51	3.09/1158.08	3.09/1043.59	3.09/1076.38
RC1	11.63/1378.73	13.25/1409.47	13.13/1405.36	13.25/1424.59	13.00/1392.81	13.00/1407.54
RC2	3.38/1086.74	3.63/1215.01	3.50/1256.85	3.50/1264.39	3.63/1221.50	3.50/1252.41
総反復回数		855	856	449	2578	1088

7. 現状解に最良解を代入する。
8.  $Q_r$  が空でない間 Step 2 へ戻る。
9. それまでに得られた最良解を出力する。

目的修正経路には、その経路長の 1000 倍がペナルティとして課せられるので、局所探索はそれを解消すべく経路を縮め、さらには消滅させるように動作する。空経路に配送先が挿入された場合にも、同様のペナルティが与えられる。

目的修正法の枠組みは、最良解を初期解として局所探索を繰り返す反復局所探索法であり、強化の能力を有する。また Step 5 によって目的修正経路内の配送先が空経路に移動する際、解が変化することで多様化もある程度実現される。

さらに、局所探索の部分を実行することで強化の能力を加えることができる。その場合 Step 5 を次のように変更する:

5. {TS, GLS} 適用後に目的修正経路が残っていたら、空経路のペナルティを 0 にして局所探索を適用する。

また、RT を組み込むことで多様化の能力を加えることもできる。その場合、上記手順の初期解と最適解をそれぞれ脱出解に読み替える。さらに Step 7 では  $Q_r$  が空であれば脱出解を生成し、その際に近傍法で新たに生成した経路を  $Q_r$  に挿入する。

#### 4 各方式の評価

Solomon のベンチマーク・インスタンスを使って、OT, TS, GLS, RT を組み合わせた 5 つの方法 (OT, OT+TS, OT+GLS, OT+RT, OT+TS+RT) を比較した。Solomon データは 100 点の配送先からなる 56 セットのインスタンスで、C1, C2, R1, R2, RC1, RC2 の 6 つのクラスに分かれている。それぞれのインスタンスを入力にして上記の 5 つの方法を実行し、各クラスごとに経路数と経路長の平均などを比較した。

各方法の実行時間の上限は 3 分とした。この時間に、初期解の生成、および RT における解集合の初期化の時間は含まない。また、TS や GLS がペナルティを解消できないまま探索を続けるのを避けるために、近傍

操作の適用回数を最大 50 に制限した。初期解は最近傍法に基づいた方法を使用した。

350MHz の計算機を使った実験により、表 1 のような結果を得た。クラスごとの各方法による経路数と経路長の平均値と、局所探索、TS、および GLS の総呼び出し回数 (反復回数) を示している。

OT+RT が 3 つのクラスにおいて最もよい結果を出している。これは反復回数の多さが関係していると考えられる。OT は 3 分以内に実行が終了してしまい、最適化が不十分な場合があった。そのために反復回数が少ない。OT+TS, OT+GLS は共に、局所解に至ってもペナルティが 0 でない間は探索を続けるため、反復回数は少なくなる。特に GLS は近傍操作の適用回数の上限まで実行する機会が多かった。ここで、OT+TS がほぼ OT+RT と並ぶ性能を出していることに注目する。これは、強化 (TS) と多様化 (RT) のいずれに重点を置いてもよい結果が得られることを示している。

#### 5 おわりに

本稿では VRPTW における局所探索の各種誘導方式の性能を比較した。経路数最小化のための誘導方式である目的修正法 (OT) に、強化に重点を置いた探索法 (TS, GLS) と多様化に重点を置いた探索法 (RT) を組み合わせた場合の性能を調べた結果、多様化に重点を置く場合に最もよい結果を得た。

#### 参考文献

- [1] I.H. Osman, "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem," *Annals of Operations Research*, 41, 421-451, 1993.
- [2] B. Backer, V. Furnon, P. Kilby, P. Prosser, and P. Shaw, "Solving Vehicle Routing Problems using Constraint Programming and Metaheuristics," *Journal of Heuristics*, to appear.
- [3] Y. Rochat and E. Taillard, *Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing*, *Journal of Heuristics*, 1, 147-167, 1995.
- [4] 岡野 裕之, 反復局所探索による車両経路問題解法における脱出法の新方式, 日本 OR 学会秋季発表会, 138-139, 1998.