

複数巡回セールスマン問題における交錯評価の検討

片田喜章（摂南大学）

概要 複数巡回セールスマン問題を解くことで得られる巡回路を複数ロボットの目標経路として採用する場合、経路が交錯することによる衝突の可能性を考慮しなければならない。本研究では複数巡回セールスマン問題で従来採用されている評価指標と併用する、経路交錯の評価指標を検討する。

キーワード: 巡回セールスマン問題, 経路計画, 複数ロボット

1 はじめに

近年、カーロボティクス¹⁾やドローン²⁾に代表されるロボット分野では、GNSSやSLAM³⁾といったハードウェアとソフトウェアの要素技術の発展が目覚ましい。これらを利用して大域情報から創出される地図上で経路計画・行動計画を立案し、計画した行動を実行する流れにある。また、これらの技術は単体のロボットに適用されることが多いが、現時点で1台の価格が高いロボットであっても、将来的に量産化が進み普及すれば価格は下がり、複数台のロボットを用いてより効率的に作業を行うように移行すると予想される。

本研究では、ロボットのような実世界で身体をもつエージェントを想定した、複数巡回セールスマン問題 (Multiple Traveling Salesman Problem: MTSP) を対象とする。分割して得られる巡回路を複数ロボットの目標経路として採用する場合など、経路が交錯することによる衝突の可能性を考慮しなければならない。そこで、本研究では複数巡回セールスマン問題で従来採用されている評価指標と併用する、経路交錯の評価指標を検討する。

2 複数巡回セールスマン問題

一般の巡回セールスマン問題は、都市の集合を $I = \{1, 2, \dots, n\}$ とすると、

$$\min L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{j, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i, i \neq j} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in I \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (4)$$

と書ける⁴⁾。ここで、 L は巡回路に含まれる経路のコストの総和、 c_{ij} は都市 i, j 間のコスト、 n は都市数、 x_{ij} は都市 i から j への経路の有無を表す。

つぎに、 m 人のセールスマンで巡回する都市群を分割する場合を考える。 k 番目のセールスマン ($k \in \{1, 2, \dots, m\}$) が担当する都市集合を I_k とすると、 $I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_k \cup \dots \cup I_m = I$ となり、かつ $I_h \cap I_k = \emptyset \quad \forall h, k, h \neq k$ とする。 m 人巡回セールスマン問題はつぎのように書ける。

$$\min L = \sum_{k=1}^m L_k = \sum_{k=1}^m \sum_{i \in I_k} \sum_{j \in I_k, j \neq i} c_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{j \in I_k, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I_k, \forall k \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_k, i \neq j} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in I_k, \forall k \quad (7)$$

$$x_{ij} = 0, \quad \forall i \in I_h, \forall j \in I_k, \forall h, k, h \neq k \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (9)$$

ここで、 L_k は k 番目のセールスマンが担当する巡回路に含まれる経路のコストの総和を表す。したがって、 m 人巡回セールスマン問題では全員分のコスト L を評価する。さらに、各セールスマンのコストをなるべく均等化したい。このため、 L_k に関する最大値や平均値⁶⁾、分散、標準偏差⁷⁾ を評価することが多い。本研究では、つぎの評価指標⁵⁾を採用する。

$$\rho = \frac{\max L_k - \min L_k}{\max L_k} \quad (10)$$

(5)(10) 式が、一般的な MTSP で評価される指標である。

3 交錯回避評価法

MTSP に関して様々な研究がなされているが、セールスマンが実体を伴い、巡回路の交錯がセールスマン同士の衝突を意味するような問題の場合、これを回避するように経路を計画する必要がある。都市群の位置が2次元平面における座標で与えられる問題の場合、MTSP で得られる巡回路は2次元平面内の連続する線分で構成される経路となる。MTSP でセールスマン同士の衝突の可能性があるのは、この経路が交錯する箇所である。衝突を考慮する1つのアプローチは、この線分の交錯が経路として現れないように計画することである。一般的な MTSP で都市の経路が対称な問題の場合には巡回方向や時系列的なセールスマンの位置を考慮することはない。一方、本研究が扱う問題設定では、これらを検討対象とする。上述のように、巡回路同士で交錯しないように計画することは可能であると思われるが、各巡回路が交錯していても、そこを同時に通過しなければ衝突は起こらない。これは上述のすべての線分の交錯が経路として現れないように計画する問題に比較して緩和された問題となる。

以上を考慮して、本研究では、Tsubouchi ら⁸⁾によって開発された移動ロボットの衝突回避アルゴリズムの考え方を採用する。以下でこれを説明する。空間の Z 軸方向に時刻 t をとり、任意のセールスマンの位置を $P_k(t) = (x_k(t), y_k(t), t)$ で表す。セールスマン a と b の位置をそれぞれ $P_a(t)$ と $P_b(t)$ で表すと、 $|P_a(t) - P_b(t)| < R$ であれば a と b は接近し衝突の可能性があるかと判定する。ここで、 R を衝突判定距離とよぶ。これにより、 x, y, t 空間において、 $(x_k(t), y_k(t))$ を中心と

し、半径 R の円が時間経過によって通過する領域は斜円柱とよばれる領域を構成する。よって、この斜円柱が他の斜円柱と領域を共有していれば衝突が起こる可能性がある。本研究では、各セールスマンは同じ速さで移動すると仮定する。そして、巡回行程でセールスマン同士が接近して衝突の可能性が生じる回数、つまり、セールスマンの経路を円の中心とする、複数の斜円柱の交錯数 *Collision* を交錯に関する最小化すべき評価指標として設定する。

4 問題設定

本研究で取り扱う問題では、2節で述べた一般的なMTSPの設定を踏襲し、3節で述べた評価指標を併用する。さらに下記の設定を行う。

1. すべてのセールスマンは共通の出発-帰還都市をもつ(以降、まとめて出発都市とよぶ)。
2. 出発都市は、出発都市以外の都市配置がつくる凸包の外側に位置する。
3. 各セールスマンの巡回方向を考慮する。

異なる出発都市を設定することは、例えば、その位置まで人がロボットを配送することを意味し、本研究の想定にそぐわない。そこで、1.により、共通の出発都市を複数移動ロボットの初期位置に設定する。同様の考え方により、2.は人が訪問できない、もしくは訪問しにくい場所に複数移動ロボットを派遣することを想定しているためであり、全都市が形成する多角形の外側にロボットの初期位置を設定する。3.はセールスマン同士の衝突、つまり、時系列的な経路の交錯を考慮しているため、巡回路を巡る向きを逆にすれば衝突を回避できることがあるためである。各セールスマンの巡回路(サブツアー)は一般的に交錯しない経路の方が短いと考えられるため、良い巡回路が得られるという想定のもとで、巡回方向に関しては各サブツアーで正回転、逆回転の2通りを考える。

5 計算機実験

本稿では、巡回する都市を m 人のセールスマンで分割するクラスタリング問題と、分割された都市内のサブツアーを計画する問題を分けて考える⁹⁾。クラスタリング手法として、k-means法を適用する。ここで、出発都市はk-means法によるクラスタリングの対象としない。また、サブツアーのソルバーとして、concordeを適用する¹⁰⁾。 $m = 3$ とし、TSPのベンチマーク¹¹⁾の中から、eil51(以下、51都市問題)とnrw1379(以下、1379都市)の問題に適用した。最も巡回路長が大きかったサブツアーを等間隔に1000分割した長さを単位時間に進む距離とすることで、すべてのサブツアーに同じ時間軸を設定する。

51都市問題で得られた結果をFig.1, Fig.2, Table 1に示す。Fig.1は得られた巡回路を示し、色の違いは担当したセールスマンの違いを表す。Table 1に得られた評価値を示す。 $\rho = 0.353$ となり、偏りが大きい値となっている。巡回方向の全組合せ 2^3 のうち、交錯数の最小値は0(Table 1)、最大値は12であった。Fig.2に時系列に沿った巡回路を示す。黒色が出発時を表し、経路に沿って時間発展的に黒から赤色に近づく。サブツ

アー間で同じ色は同じ時間帯であることを表す。つまり、同じ色が交錯していなければ、衝突は起こらないことを意味する。

つぎに1379都市問題で得られた結果をFig.3, Fig.4, Table 2に示す。 $\rho = 0.142$ となり、51都市問題よりも小さい値となった。また、都市数が多い問題の方が交錯数は多くなると予想されるが、本1379都市問題では、巡回方向の全組合せで交錯数は0となった。

出発都市を都市群の中心付近に設定するMTSPと比べて、本研究の問題設定では一般的に経路同士の交錯数は多くなると予想される。また、 m を大きくした場合の結果も考察する必要がある。つぎに、巡回方向を考慮しても0にならない場合や ρ を小さくするために、都市群の適応的な分割法を多目的最適化の観点から検討していきたい。

6 おわりに

本稿では、複数巡回セールスマン問題において、セールスマン同士の衝突を避けることを目的として経路交錯の評価指標を検討した。そして、TSPベンチマークの2つの問題に対し、k-means法とconcordeを用いた手法を適用し、MTSPで一般的な指標と経路交錯の指標を評価した。今後、他のクラスタリング手法の適用およびセールスマン数の増加を行い、様々なTSPベンチマーク問題に対してMTSPで一般的な指標と経路交錯指標の評価を行っていきたい。

参考文献

- 1) 永井, ラクシンチャラーンサク: カー・ロボティクス, ZMPパブリッシング(2010)
- 2) 吉田: 飛躍するドローン, ニッケイ出版(2016)
- 3) 友納: SLAM入門, オーム社(2018)
- 4) 山本, 久保: 巡回セールスマン問題への招待, 朝倉書店(1997)
- 5) 渡邊, 小野, 松永, 金川, 高橋: ファジィc-means法を用いた複数巡回セールスマン問題の1解法, 13-1, 119/126(2001)
- 6) I. Vandermeulen, R. Groß, A. Kolling: Balanced Task Allocation by Partitioning the Multiple Traveling Salesperson Problem, In Proc. of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2019), 1479/1487(2019)
- 7) 坂本, 延寛, 鈴木, 山本, 古川, 渡辺: 局所クラスタリング組織化法によるn-TSPに解法, 2008年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, 35/36(2008)
- 8) T. Tubouchi, T. Naniwa, S. Arimoto: Planning and Navigation by a Mobile Robot in the Presence of Multiple Moving Obstacles and Their Velocities, Journal of Robotics and Mechatronics, 8-1, 58/66(1996)
- 9) X. Xu, H. Yuan, M. Liptrott, M. Trovati: Two Phase Heuristic Algorithm for The Multiple-travelling Salesman Problem, Soft Computing, 22, 6567/6581(2018)
- 10) Concorde TSP solver, <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde/>
- 11) TSPLIB, <http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>

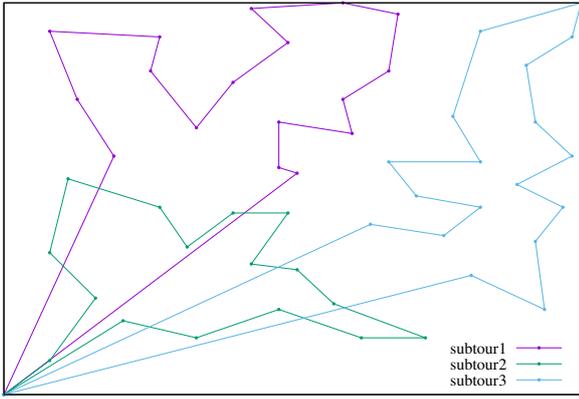


Fig. 1: Best tour for k-means clustering in eil51.tsp

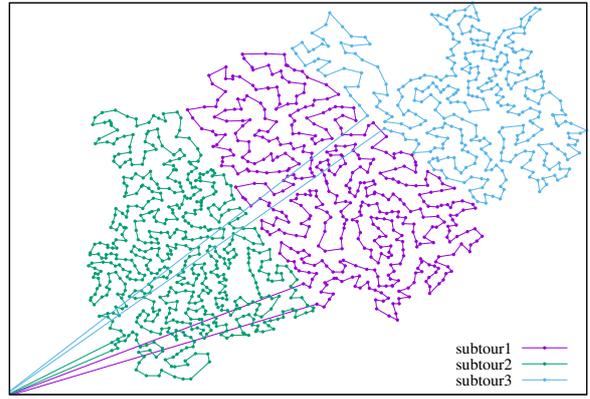


Fig. 3: Best tour for k-means clustering in nrw1379.tsp

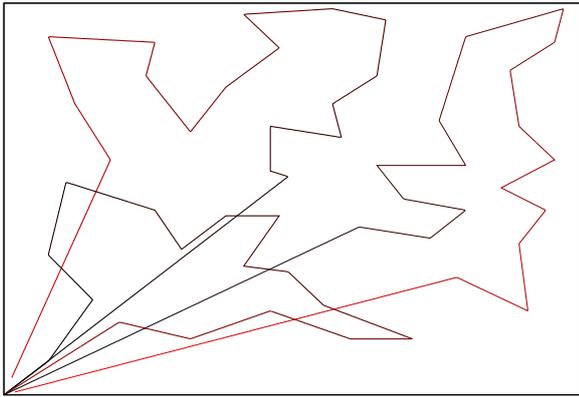


Fig. 2: Best tour for time series in eil51.tsp

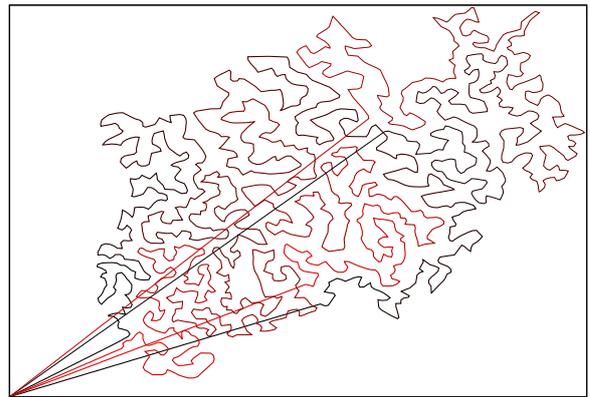


Fig. 4: Best tour for time series in nrw1379.tsp

Table 1: Evaluation for eil51.tsp

L_1	228
L_2	163
L_3	252
L	643
ρ	0.353
<i>Collision</i>	0

Table 2: Evaluation for nrw1379.tsp

L_1	23807
L_2	22418
L_3	20419
L	66644
ρ	0.142
<i>Collision</i>	0