多目的進化型人工神経回路網を用いた複数 TSP の解法

パレートフロントにおける端点と選好解の特徴

片田喜章 †,渡邉真也 †† 大倉和博 ‡,

摂南大学[†], 室蘭工業大学大学院^{††} 広島大学[‡]

1 はじめに

巡回セールスマン問題(TSP)は複数都市の地理情報が与えられ,セールスマンが全都市を訪問し重複なく一巡して出発した都市に戻る経路を求める問題である $^{1)}$. TSPは数理最適化の典型的な問題であり,厳密解法 $^{2,3)}$ ・メタヒューリスティックスを用いた解法 $^{4,5)}$ など多くの研究がある.典型的なTSPは 1 人のセールスマンの経路問題であるのに対し,複数人のセールスマンが担当する都市を決めて訪問する経路を求める問題は複数巡回セールスマン問題(Multiple Traveling Salesman Problem: MTSP) とよばれる.

MTSPでは従来,都市を割り当てる場合に訪問都市群が1つの塊を形成するような割り当てを実施することが多 $1^{(6,7)}$.そして,割り当てられた都市群に対しそれぞれでTSPを解くという手法が用いられる8).しかし,出発都市を全セールスマンで共通にする場合など,割り当てられる都市群が1つの塊を形成していることが総巡回路長の削減やTSPに分類される応用事例で独自に設定された評価指標の改善に寄与するとは限らない.

そこで、我々は訪問都市群の割当てを複数評価指標にもとづいて決定するために、多目的進化計算を用いて設計する人工神経回路網(ANN)を使用し、割り当てられた都市群の巡回路をTSPで広く採用されている近似解法を用いて解く、二段階探索法⁸⁾を提案している⁹⁾.文献⁹⁾では、3人のセールスマンに訪問都市群を割り当てる場合の実験を行い、提案手法はk-means法よりも良

Multi-Objective Evolutionary Artificial Neural Networks Approach to Multiple TSP

Department of Electrical and Electronic Engineering, Setsunan University (†)

College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology $(\dagger\dagger)$

Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University (‡)

い目的間数値が得られることを確認した.

本稿では、TSPに関するテスト問題を用いて、3,4,5人のセールスマンに訪問都市群を割り当てる場合の計算機実験を行って提案手法の有効性を検証する.また、得られたパレートフロントの端点と選好解の特徴を調べる.

2 都市クラスタリング手法

地理情報に基づいて訪問都市を割り当てる(分類する)手法を以降,都市クラスタリング手法とよぶ.本研究では完全結合型フィードフォワード ANNを用いる(図1).ここで,入力は正規化した都市座標の値 $x,y \in \{0.0,1.0\}$,各ニューロンの活性化関数はシグモイド関数,出力の値はセールスマンkの選択確率とし,ソフトマックス関数によりkを決定する.本設定を用いることにより,都市座標平面を非線形に分割することが可能になる.さらに多目的進化計算を用いてANNを設計することで,複数評価指標にもとづく適応的な訪問都市割当てが期待できる.

ANNの入力ノード数を N_i ,中間ノード数を N_h ,出力ノード数を N_o とすると,各ニューロンにバイアスを設定するため,ニューロン間の結合荷重の合計数は $N=(N_i+1)N_h+(N_h+1)N_o$ になる.図1は $(N_i,N_h,N_o)=(2,4,3)$ の場合を示している.

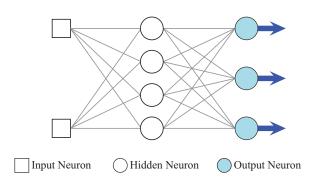


Fig. 1 フィードフォワード型人工神経回路網

[†] Yoshiaki Katada(katada @ setsunan.ac.jp)

^{††} Shinya Watanabe(sin @ csse.muroran-it.ac.jp)

[‡] Kazuhiro Ohkura(kohkura @ hiroshima-u.ac.jp)

3 MTSPの目的関数

 L_k をk番目のセールスマン $(k \in \{1,2,\cdots,K\})$ が担当する都市の巡回路長,Kは巡回可能なセールスマン数とする.MTSPではセールスマン全員分の巡回路長を評価する.本研究では式(2)により,巡回路長の合計を都市の割当てがあったサラリーマン数K'で除して平均巡回路長として算出している.これは巡回可能なサラリーマンをできるだけ多く参加させたいという動機による.さらに,各セールスマンの巡回路長をなるべく均等化したい.このために L_k に関する最大値や平均値 10),分散,標準偏差 7)が評価されることが多い.本研究では,均等化係数 6)とよばれる式(3)を採用する.したがって, 2 目的最小化問題(m=2)を解くことになる.

minimize
$$F(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}))$$
(1)
$$f_1 = \frac{1}{K'} \sum_{k=1, L_k \neq 0}^{K} L_k$$
(2)

$$f_2 = \frac{\max_{1 \le k \le K} L_k - \min_{1 \le k \le K, L_k \ne 0} L_k}{\max_{1 < k < K} L_k}$$
(3)

4 進化型多目的最適化

2章で述べたANNの重みの設計に実数値型の多目的進化計算である $MOEA/D-DE^{11)}$ を適用する。MOEA/D-DEは多目的最適化問題を複数の単目的最適化問題に分割し原問題のパレートフロントを近似する $MOEA/D^{12)}$ と,実数値型の最適化問題を扱う差分進化(DE)のオペレータとpolynomial mutationで構成されている。複数の単目的最適化問題を集約する関数として,文献 $^{12)}$ では 3 では 3 種類が提案されているが,本研究では $^{12)}$ では 3 種類が提案されている。

$$g(\mathbf{x}|\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{z}^*) = \max_{1 \le i \le m} \{\lambda_i | f_i(\mathbf{x}) - z_i^* | \}$$
 (4)

ここで,mは目的関数の数, \mathbf{z}^* は参照点, $\boldsymbol{\lambda}$ は重みベクトルを表す.参照点は探索中に得られた各目的関数 f_i の最小値が用いられる場合が多い.重みベクトルの要素は文献 12)に倣って $\{0/H,1/H,\cdots,H/H\}$ のいずれかをとり, $\sum_1^m \lambda_i = 1$ を満たすものとする.m = 2のときの重みベクトルを図2に示す.

なお,3章で述べた目的関数間でスケールが大きく異なるため,式(4)における f_i は正規化した

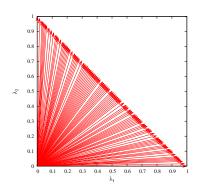


Fig. 2 2目的空間における重みベクトル

値を使用する $^{13)}$. 各目的関数の最小値については初期世代から現在 (t_c) まで,最大値については1世代前 (t_c-1) と現在 (t_c) の値を用いる.

5 計算機実験

5.1 問題設定

本稿では,TSPのベンチマーク $^{14)}$ の中から,fnl4461(以下,4461都市問題)を対象とする(図3).本問題の1人のセールスマンによる最短巡回路長は182,566であることが報告されている.

さらに出発都市に関して下記の設定を行う.

out: 出発都市は,出発都市以外の全都市配置がつくる凸包の外側に設置する.すべてのセールスマンはこの都市を共通の出発都市とする.上記4461都市問題では(5500,5500)の位置に出発都市を設置する.

inc: 出発都市以外の全都市配置の中心に出発都市を設置する. すべてのセールスマンはこの都市を共通の出発都市とする.

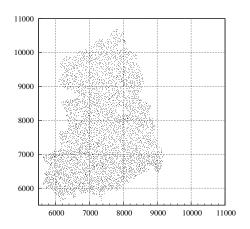


Fig. 3 4461都市問題

each: 割り当てられた都市群毎に出発都市を設置 する.したがって,各セールスマンは共通の 出発都市をもたない.

したがって, out, incの都市設定では都市数は4462, eachでは4461となる.

5.2 計算機実験設定

2章で述べたANNsの結合荷重値 $w\in\{-4.0,4.0\}$ を3章で述べた2目的最小化問題の設計変数とする.本問題設定ではANNの出力ノード数 N_o は巡回可能なセールスマン数Kと等しくなる.本稿では $(N_i,N_h,N_o)=(2,4,K)$, $K\in\{3,4,5\}$ として,各設定に関してMOEA/D-DEを10試行実行した.MOEA/D-DEに関する設定パラメータを表1に示す.

ANNによって割り当てられた都市群の巡回路をTSP近似解法 $(LKH-2.0.9)^{15,\ 16)}$ を用いて解く、MOEA/D-DEの1個体の評価に関して,LKHの実行時間を1sとし,5-opt,no-patching(C=0)とする

また,MOEA/D-DEによって得られる解を考察するために,4461都市問題の出発都市に関する各設定に対しセールスマン数をK=1とし,LKHを上記と同じ設定で実行する計算を行った.

5.3 計算機実験結果

5.3.1 K=1の場合

セールスマン数をK=1とし,各出発都市の設定にLKHを適用して得られた最短巡回路長 $(\hat{f}_1$ とする)を表2に示す。eachの結果は純粋なTSPの問題と等価であり,報告されている最短巡回路長に近い値が獲得されている。なお,表中には後述する考察のために, \hat{f}_1 をKで除した値も示している。

5.3.2 MTSPに関する結果(K = 3, 4, 5)

各出発都市の設定に関して,K=3,4,5の場合にMOEA/D-DEを10試行実行した中で任意の試行において得られたパレートフロントを図4-12に示す.1試行の間に獲得された全非劣解をアーカイブとして保存し描画している.4章で述べた

Table 1 MOEA/D-DEの設定パラメータ

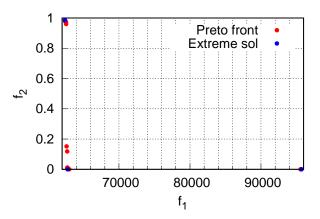
N	100	T	10
δ	0.9	n_r	2
F	0.5	CR	1.0
重みベクトル数	100	評価回数	20000

ように,本問題設定は実数値を設計変数とする最適化問題であるが,MTSPは基本的に組合せ最適化問題のために目的関数値は離散値をとる.そのため,得られたパレートフロントも離散的である.各軸に対し,十分に収束していることがわかる.K=3の場合,非劣解の数はそれほど多く獲得されなかった.K=4,5の場合,都市群ごとに出発都市をもつ場合を除いて多くの非劣解を獲得している.また,各図に $f_1 \cdot f_2$ 軸に沿った端点と著者が選出した解(選好解)を示した.得られた非劣解集合を代表する点として,これらを以下で考察する.

出発都市が外側に位置する場合に得られた各巡 回路長と目的関数値を表3,4,5 に示す.表中,-は そのセールスマンに出発都市以外の都市の割当 てがなかったことを表す.ここで,inv1は図4,5,6 において, f_2 軸に沿った端点を示した解,inv2は 選好解 f_1 軸に沿った端点を示した解を表 す.まず,inv1は f_1 の値が非常に小さく, f_2 の値 が大きい値を示している.inv1は1人または2人の サラリーマンに少数の都市を割り当てK'=Kを 満たし,残りのサラリーマンに大部分の都市を割 り当てていると解釈できる.そのため, f_1 は最 小値をとるが、 f_2 に見られるように最小巡回路 長は最大巡回路長の $1 \sim 2\%$ となっている.また, inv1が示す f_1 の値は $\hat{f_1}/K$ を基準として,それよ リも少し大きい値と考えられる(表2).inv2は選 好解であり、 f_1 の値はinv1に次いで $\widehat{f_1}/K$ に近く、 セールスマン間の巡回路長差は最大巡回路長 の2%以下となっている.inv3は f_1 の値が大きく, f_2 の値が極めて小さい.これは2人だけに都市を 割当てており、割り当たられた2人の巡回路長の 差が最大巡回路長の0.1%以下となっているため である.また,inv3が示す f_1 の値は $\hat{f}_1/2$ を基準と してそれよりも少し大きい値と考えられる(表2).

Table 2 各出発都市に対するK = 1の場合に得られた最短巡回路長

	out	inc	each
\widehat{f}_1	183946.2	182884.6	182908.0
$\widehat{f}_1/2$	91973.1	91442.3	91454.0
$\widehat{f}_1/3$	61315.4	60961.5	60969.3
$\widehat{f}_1/4$	45986.5	45721.2	45727.0
$\widehat{f}_1/5$	36789.2	36576.9	36581.6



 ${
m Fig.~4}$ 出発都市が外側に位置する場合のパレートフロント(K=3)

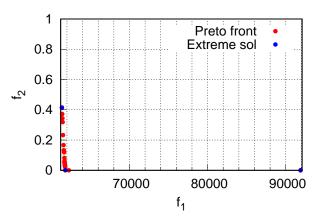
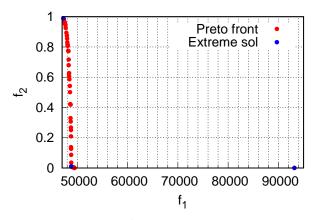


Fig. 7 出発都市が中心に位置する場合のパレートフロント(K=3)



 ${
m Fig.}~5$ 出発都市が外側に位置する場合のパレートフロント(K=4)

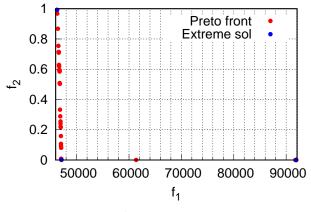


Fig. 8 出発都市が中心に位置する場合のパレートフロント(K=4)

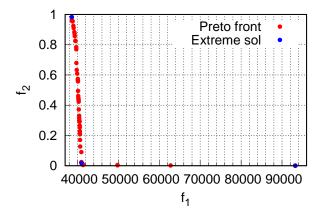


Fig. 6 出発都市が外側に位置する場合のパレートフロント(K=5)

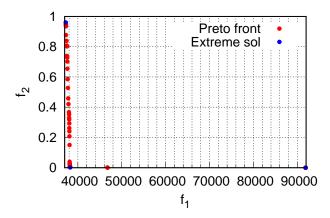


Fig. 9 出発都市が中心に位置する場合のパレートフロント(K=5)

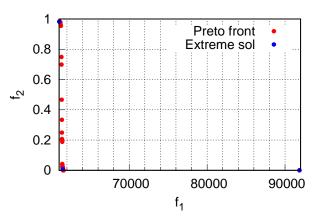
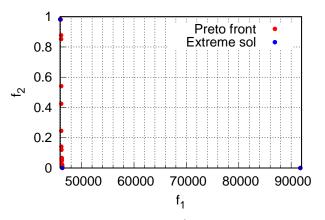


Fig. 10 割り当て都市群ごとに出発都市をもつ 場合のパレートフロント(K=3)



 ${
m Fig.~11}$ 割り当て都市群ごとに出発都市をもつ場合のパレートフロント(K=4)

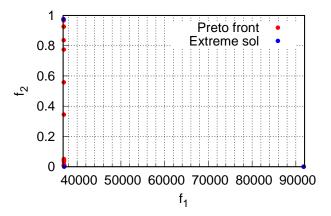


Fig. 12 割り当て都市群ごとに出発都市をもつ 場合のパレートフロント(K=5)

Table 3 出発都市が外側に位置する場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=3)

	inv 1	inv 2	inv 3		
L_1	1392.0	62790.9	-		
L_2	92014.2	62761.9	95727.9		
L_3	93782.9	62799.3	95703.6		
f_1	62396.4	62784.0	95715.7		
f_2	0.985157	0.000595	0.000255		

Table 4 出発都市が外側に位置する場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=4)

	inv 1	inv 2	inv 3
L_1	61923.1	49031.5	93194.7
L_2	122882.0	48851.0	93144.6
L_3	2843.5	48875.0	-
L_4	1365.7	48475.4	-
f_1	47253.6	48808.2	93169.7
f_2	0.988886	0.011342	0.000537

Table 5 出発都市が外側に位置する場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=5)

	inv 1	inv 2	inv 3
L_1	2503.3	40546.0	93213.5
L_2	19016.4	341074.6	-
L_3	22660.1	41162.2	_
L_4	4173.2	40935.8	-
L_5	144730.0	41271.1	93279.8
f_1	38616.6	40997.9	93246.6
f_2	0.982703	0.017570	0.000711

出発都市が中心に位置する場合,割当て都市群ごとに出発都市をもつ場合に得られた各巡回路長と目的関数値を表6-11 に示す.表中,一は出発都市が中心に位置する場合には出発都市が中心に位置する場合には割当て都市郡がのむことを表す.出発都市都数が0もしくは1であったことを表す.出発都市の位置の違いによる巡回路長の合計値に違いがあるが,出発都市が外側に位置する場合と同様の傾向が見られる.出発都市が中心に位置する場合のK=3に関して,inv1 が $f_2=0.41$,つまり,最小巡回路長は最大巡回路長の約半分となり,割り当て都市数・巡回路長が小さくなく,唯一傾

Table 6 出発都市が中心に位置する場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=3)

	inv 1	inv 2	inv 3
L_1	46421.6	61771.1	91894.2
L_2	79271.0	61831.9	91890.7
L_3	58387.3	61791.2	-
f_1	61359.9	61798.1	91892.4
f_2	0.414394	0.000983	0.000039

Table 7 出発都市が中心に位置する場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=4)

··· — •				
	inv 1	inv 2	inv 3	
L_1	58772.1	47046.6	91931.3	
L_2	60117.3	47118.6	91927.3	
L_3	65684.5	47036.9	-	
L_4	509.8	47134.1	-	
f_1	46270.9	47084.0	91929.3	
f_2	0.992238	0.002063	0.000044	

Table 8 出発都市が中心に位置する場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=5)

		/
inv 1	inv 2	inv 3
32418.7	38219.2	91908.1
49515.6	338222.7	_
52583.7	38276.1	_
49550.0	38239.0	91908.1
2118.5	38310.0	-
37237.3	38253.4	91908.1
0.959712	0.002371	0.000001
	32418.7 49515.6 52583.7 49550.0 2118.5 37237.3	32418.7 38219.2 49515.6 338222.7 52583.7 38276.1 49550.0 38239.0 2118.5 38310.0 37237.3 38253.4

向の異なる点である.

5.3.3 K=5に関する巡回路

K=5に関して,各出発都市の設定におけるinv1,2,3のそれぞれの巡回路を図13,14,15に示す.ここで,1つの色が1人のサラリーマンの巡回路を表す.帯状の塊が現れることは,提案手法で得られるANNで都市の割当てを行う場合の特徴の1つである9).また,前節で述べたinv1,2,3の割当て戦略が各巡回路にも表れている.つまり,inv1は図中でかろうじて確認できるほどの少ない都市割当てを1人または2人のサラリーマンに行い,残りのサラリーマンで大部分の巡回路を形成している.inv2は巡回路を均等に構成して

Table 9 割り当て都市群ごとに出発都市をもつ場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=3)

- 1.3 -			
	inv 1	inv 2	inv 3
L_1	6051.0	61165.7	91852.9
L_2	2934.0	61680.6	-
L_3	174135.1	61570.7	91863.6
f_1	61040.1	61472.3	91858.2
f_2	0.983151	0.008348	0.000117

Table 10 割り当て都市群ごとに出発都市をもつ場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=4)

	inv 1	inv 2	inv 3
L_1	139702.2	46318.9	91776.2
L_2	2417.1	46275.9	-
L_3	38257.1	46324.7	46189.7
L_4	3268.7	46280.8	_
f_1	45911.3	46300.1	91766.7
f_2	0.982698	0.001053	0.000208

Table 11 割り当て都市群ごとに出発都市をもつ 場合に得られた巡回路長と目的関数値(K=5)

	inv 1	inv 2	inv 3
L_1	116810.2	37033.0	91803.9
L_2	16840.7	37038.2	-
L_3	2964.3	37053.8	91732.2
L_4	10266.8	37052.9	-
L_5	37491.8	37019.2	-
f_1	36874.8	37039.4	91768.0
f_2	0.974623	0.000932	0.000781

おり,望ましい巡回路となっている.inv3は2人で都市を分割しており,巡回路長がほぼ等しくなっている様子がわかる.

K=3,4の巡回路に関しても同じような結果が得られた.

6 おわりに

本研究では複数巡回セールスマン問題に対し, 多目的進化計算を用いて設計する人工神経回路 網を用いて訪問都市群の割当てを行い,割り当 てられた都市群の巡回路を近似解法を用いて解 く手法を提案し,TSPに関するテスト問題を用 いて計算機実験を行って提案手法の有効性を検

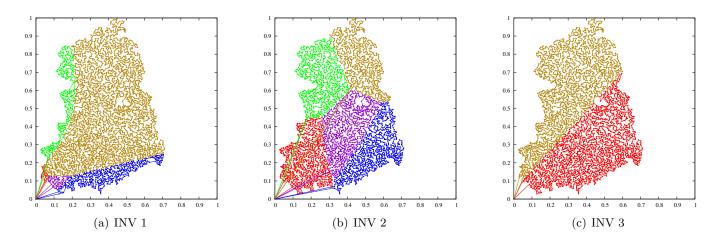


Fig. 13 出発都市が外側に位置する場合に得られた巡回路(K=5)

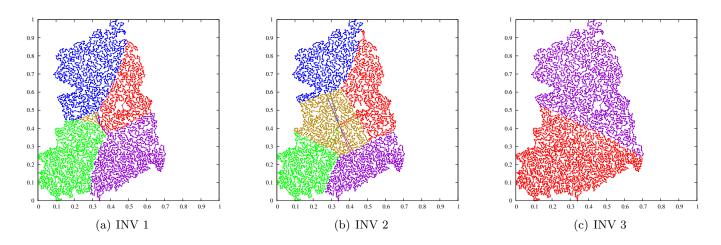


Fig. 14 出発都市が中心に位置する場合に得られた巡回路(K=5)

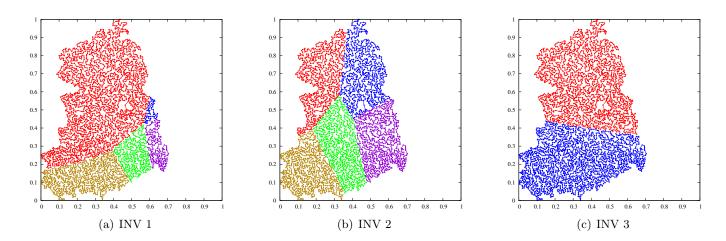


Fig.~15 割当て都市群ごとに出発都市をもつ場合に得られた巡回路(K=5)

証した.さらに,得られたパレートフロントの 端点と選好解の特徴を調べた.得られた結果を 以下にまとめる.

- f_1 が極端に良い解では、1人または2人がその他の数%の経路を巡回し、残りの人で多くの都市を巡回する(出発都市が中心に位置する場合のK=3を除く).この場合の f_1 の値は(1人TSPの最短巡回路長/巡回可能なサラリーマン数)に近い.
- 選好解では各目的関数の最小値に近い $.f_1$ の値は(1人TSPの最短巡回路長/巡回可能な サラリーマン数)に近く $,f_2$ の値はセールス マン間の巡回路長差で1.7%以下を示した .
- f₂が極端に良い解は2人で都市群を巡回し, f₁の値は(1人TSPの最短巡回路長/2)に近く, 巡回路長差は0.1%以下を示した。

従って、提案手法によって得られた選好解は出発都市の位置に適応して、各セールスマンで平均化された短い巡回路を形成している。

今後,各セールスマンの巡回路長に制約を設ける問題に取り組みたい.また,ANNを用いて都市群の割当てを行なっていることの有用性を検証する目的で,巡回路計画後に訪問都市群が追加されることを想定した実験を行う予定である.

これらの結果をもとに,複数ドローンの飛行経路計画問題に取り組む.出発都市を離着陸を行う地点,巡回する都市を通過点(ウェイポイント)に対応させて考えるとMTSPと捉えられる.現在,本稿で扱った問題設定に加えて,衝突回避を目的関数に含めた実験を行っている.

謝辞

本研究は科研費(21K12081)の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) 山本,久保「巡回セールスマン問題への招待」 朝倉書店,1997
- 2) ウィリアム・J・クック, 驚きの数学 巡回セール スマン問題」青土社, 2013
- 3) Concorde TSP solver, http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde/
- 4) 永田,小林,巡回セールスマン問題に対する交叉: 枝組み立て交叉の提案と評価,人工知能学会誌, Vol.14, No.5, pp.848-859, 1999

- 5) M. Dorigo, K. Socha, An Introduction to Ant Colony Optimization, Approximation Algorithms and Metaheuristics, CRC Press, 2007
- 6) 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一解法,日本ファジィ学会誌,Vol.13,No.1,pp.119-126,2001
- 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,pp.35-36,2008
- 8) X. Xu, H. Yuan, M. Liptrott, M. Trovati: Two Phase Heuristic Algorithm for The Multipletravelling Salesman Problem, Soft Computing, 22, pp.6567–6581, 2018
- 9) 片田,渡邉,多目的進化型人工神経回路網を用いた複数TSPの解法,第15回進化計算シンポジウム2021講演論文集,pp.170-175,2021
- 10) 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), pp.1479– 1487, 2019
- 11) H. Li, Q. Zhang, Multiobjective Optimization Problems With Complicated Pareto Sets, MOEA/D and NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 13, No. 2, pp.284–302, 2009
- 12) Q. Zhang, H. Li, MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 11, No. 6, pp.712–731, 2007
- 13) L. He, H. Ishibuchi, A. Trivedi, H. Wang, Y. Nan and D. Srinivasan, A Survey of Normalization Methods in Multiobjective Evolutionary Algorithms, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 25, No. 6, pp. 1028–1048, 2021
- 14) TSPLIB, http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/ software/TSPLIB95/
- 15) K. Helsgaun, General k-opt submoves for the Lin-Kernighan TSP heuristic, Mathematical Programming Computation, 1:119-163, 2009
- 16) LKH-2.0.9 http://webhotel4.ruc.dk/~keld/ research/LKH/