

複数運行形態の進化型最適化に基づく 環境変化に適応可能なバス路線網生成

○梶原奨 村田暁紀 長谷川智 小林亮太 佐藤寛之 高玉圭樹 (電気通信大学)

Bus route network generation adaptable to environmental changes based on evolutionary optimization of multiple modes of operation

*S. Kajihara, A. Murata, S. Hasegawa, R. Kobayashi, H. Sato, and K. Takadama
(The University of Electro-Communications)

Abstract— Towards adaptation to environmental change, this paper proposes the bus route network optimization method that generates alternative plan only changing the mode of operation (stop or pass of bus stop) while maintaining route network when the number of available buses and situation of the bus stops change due to disaster. Experiments on Mandl transport benchmark problem has revealed the following implications: the proposed method (1) succeeded in generating alternative mode of operations with equivalent performance to the original route network; (2) can generate alternative mode of operations decreasing number of buses by allowing an increase in passenger travel time.

Key Words: Generalization, route optimization problem, adaptation to environmental change

1 はじめに

現代社会において、都市での公共交通は効率的な輸送手段であり多くの人々が利用している。しかし、災害時には鉄道などの公共交通網が麻痺し、人々の移動手段に大きな影響を及ぼす。また、災害時に鉄道が使えたととしても、鉄道による帰宅行動は駅や列車に人が過剰集中するなど多くの危険性をはらんでいることが指摘されている¹⁾。一方、東日本大震災で見られたようにバスはその他の交通手段に比べると災害に強く、多くの人々の交通手段の代替となったことが知られている²⁾。そのため災害時にはバス利用者の増加が想定され、かつ普段の乗客の流れが変わることも考えられる。このとき平時のバス路線網は災害時の乗客の流れを想定した設計はされていないため、新たな乗客の流れによっては路線網の性能(出発地から目的地まで乗客を運ぶのに要する時間と必要バス台数)が著しく落ち、バス台数が不足することにより乗客の停留所での待ち時間が長くなることや、停留所に利用者が滞留してしまうといった問題が起きる。

災害時でも路線網の性能を保つために、間島ら³⁾は各路線をエージェントに見立てエージェントに基づく路線網修正手法を提案した。具体的には、利用者の需要と道路状況をもとに平時の路線網に修正を加えることで、直ちに災害用の路線網を生成する手法を提案した。北川ら⁴⁾は、平時から災害時用の路線網に変更した時に、利用者の移動経路の変動量を最小にするような路線網生成手法を提案した。また森本ら⁵⁾は、災害時の帰宅困難者の滞留の早期解消に焦点を当て、路線間でのバス台数の調整や路線網の分割・統合によって滞留を解消しようとする路線網最適化手法を提案した。高谷ら⁶⁾は、同じく災害時の帰宅困難者の滞留解消方法として、路線網の形状は平時のものを保ったまま、路線間でバスを譲渡することによって解決する路線網最適化手法を提案した。

このように従来の多くのバス路線網最適化は、環境変化が起こると路線網を新たに再構築する必要があり、

路線においての始発、終着停留所が変わるだけでなく、停車順や停車場所も変更されるため、利用者に混乱を招く。また、路線網の変化を少なくしてもバス台数を増やすことや路線間で大量のバスを譲渡することは現実的に困難である。さらに、全バス停に停車するという固定の運行形態を前提としており、バス停を通過した方が良い状況でも停車する。

そこで、本研究ではバス停の停車か通過を変更できる運行形態を導入するとともに、同じ路線網の中で運行形態が似たものをまとめて一般化(元になる運行形態を基準とし、少し異なる代替運行形態を追加)しながら、乗客の総移動時間と使用するバス台数を最小化するように路線網を進化させる方法を考案する。具体的には、代表的な多目的最適化手法であるNSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)⁷⁾と、複数の運行形態から停車・通過を切り替えることによって表現される代替運行形態を見出す機構を組み合わせることで、新たな環境下に適応可能なバス路線網の発見・獲得を目指す。代替運行形態とは基準となる路線網との形状は変わらず、各路線が保持する停留所も同じであり停車と通過のみが異なるものをいう。このとき、NSGA-IIに入力する初期解は間島らのエージェントに基づく複雑ネットワークによる路線網構築手法で最適化された路線網とする。

2 多目的最適化とNSGA-II

前章で述べた乗客の総移動時間と必要バス台数間のような関係を持つ多目的最適化問題は目的関数間にトレードオフの関係があり、ある1つの目的を優先するともう一方もしくはその他の目的の性能が悪化し、一意に最適解を決めることができない。そのため、多目的最適化問題はトレードオフ関係にある最適解集合(パレート最適解)の獲得を目的とし、そのパレート最適解を獲得する進化型最適化アルゴリズムの代表的な手法であるNSGA-IIは非優越ソートと呼ばれる解の評価値に応じてランクを与える方法を用いランクの良い解を次世代に残し、進化させて更新する。進化の過程で

は、複数の解を組み合わせる交叉や、解の一部に変化を施す突然変異により新たな解を生み出し、混雑度距離を考慮することによって解の多様性を維持しながら、解集団の性能を上げて最適化を図る。なお、混雑度距離とは解空間における解が周りの解からどれほど離れているかを示す指標であり、混雑距離が大きいほど解が密集せず広がっていることを意味し、解の多様性に貢献する。以下 Fig. 1 に Pareto 最適解を表現した図を示す。Fig. 1 中の解に添えられた数字はその解のランクを表し、同じ数を持つ解は優劣がつけられないことを示している。

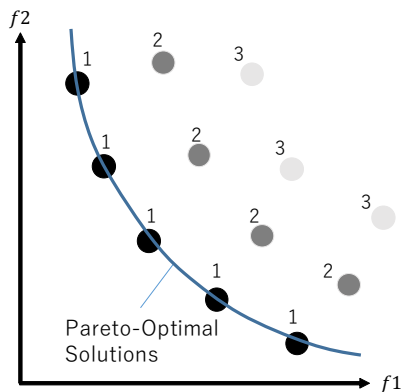


Fig. 1: Pareto-Optimal Solutions

3 代替解生成に基づく多目的進化型最適化

3.1 アーキテクチャ

多目的進化型最適化の過程で得られたある解に対して、性能を維持した代替案を与える方法として、基底となる解と似た解の差分 (S#) を記録しこれらをまとめて表現できる一般化方法⁸⁾がある。アーキテクチャを以下 Fig. 2 に示す。はじめに、親母集団 P_t が子母集団 Q_t を生成し、Fig. 3 のようにして一般化する。その後、NSGA-II と同じように母集団をランク分けし、ランクごとに混雑距離を計算し、次世代集団 R_{t+1} を生成する。

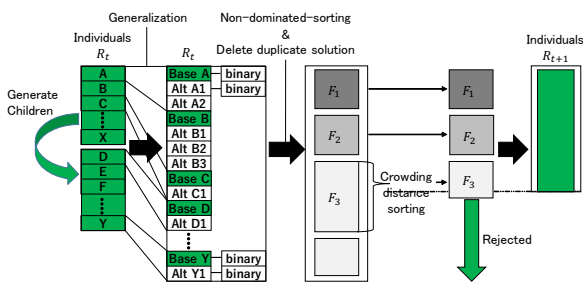


Fig. 2: Architecture: Generalization and Optimization

3.2 解の一般化による代替解生成方法

次に、解の一般化方法を詳しく説明した図を以下 Fig. 3 に示す。Fig. 3 では、初めに基底となる解とその比較対象を①抽出し、それらを②照合する。照合の結果、0/1 で表現された解に対して差が閾値 bit 以下かつ③SharpDistance が条件を満たしているならば差分のところに④S#(swap#) を記録し解を⑤上書きする。ここで、基底解である IndA の照合対象は他の基底解である IndB-X の中で解を構成する binary 列の数が同

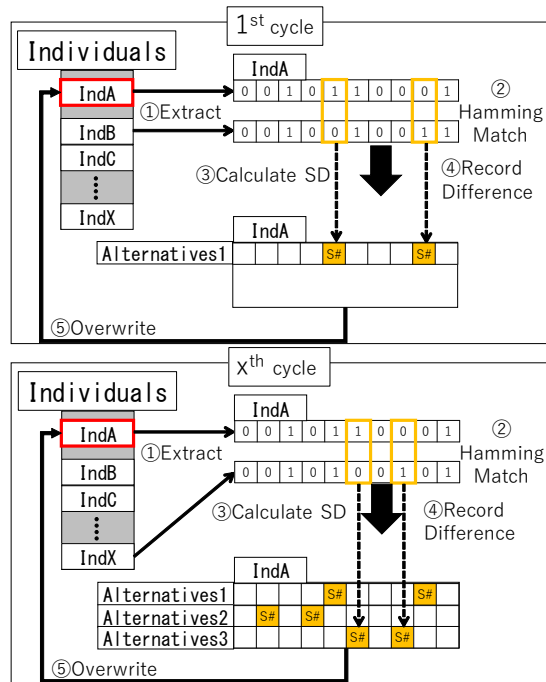


Fig. 3: Generalization

じ解とする。IndA は 3 つの代替解を保持しており、代替解 1 は左から 5 番目と 9 番目を変更したものである。この一般化方法における解とは、遺伝子長と全バス停車数が同じであり各バス停に 0/1 を割り振ることで停車と通過を表現可能にする。SharpDistance については 3.4 節で説明する。以下に一般化の疑似コードとその説明を示す。疑似コードにおける①~⑤はそれぞれ Fig. 3 中の①~⑤に該当する。

Algorithm 1 Generalization(P)

```

1:  $d \leftarrow \text{getMaxMinFitnessDistance}(P)$ 
2:  $\text{alternatives} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $SD \leftarrow 0$ 
4:  $HD \leftarrow 0$ 
5:  $(x, y) \leftarrow (0, 0)$ 
6: for each  $p \in P$  do ①
7:   for each  $q \in P$  do ①
8:      $(x, y) \leftarrow \text{getHummingPosition}(p, q)$  ②
9:      $HD \leftarrow \text{getHummingDistance}(p, q)$  ③
10:    if  $HD \leq \theta_{HD}$  then ③
11:       $q.s\#.Add(x, y)$  ④
12:    end if
13:     $SD \leftarrow \text{getSharpDistance}(p, q, d)$  ③
14:    if  $SD \leq \theta_{SD}$  then ③
15:       $p.alternatives.Add(q)$  ④⑤
16:    end if
17:  end for
18: end for

```

- 1~5 行目：各変数の初期化
変数 d に母集団における各目的軸の最大評価値と最小評価値の差を代入する。alternatives は代替解を保持するリスト、 (x, y) は置かれる S# の座標であり x は路線番号を、 y はバス停番号を表す。

- 8~12 行目：差分とハミング距離の計算および記録
 p と q を照合の結果，得られた差分を (x, y) に代入する．ハミング距離を計算し，差が閾値 θ_{HD} 以下ならば q の $S\#$ に座標を記録する．
- 13~16 行目：SharpDistance の計算
 SharpDistance を計算し，その値が θ_{SD} 以下ならば基底解 p に代替解として q を追加する．

一般化により得られた代替解は基底解に若干の修正 ($S\#$ 部の変更) を加えるだけで獲得することができる．この方法によって環境変化時は基底解から代替解に変更することで対応可能となる．この一般化の機構を NSGA-II と組み合わせることにより，最適化にかけられた性能の損なわれない代替解を獲得することが可能となる．

3.3 多目的空間における代替解をもつ基底解のランク決定方法

NSGA-II などの多目的進化型アルゴリズムは評価値の良い個体を次世代に残すため，ランクに基づき解を評価する．一方，一般化によって獲得した代替解を持つ基底解は単体としてではなく，代替解を含んだ包括的な評価が必要となる．そこで基底解のランクは，基底解自身のランクと代替解のランクを平均した平均ランクにより計算する．また混雑距離については基底解と代替解の混雑距離の和を用いる．以下 Fig. 4 に平均ランクおよび混雑距離の計算方法を示す．

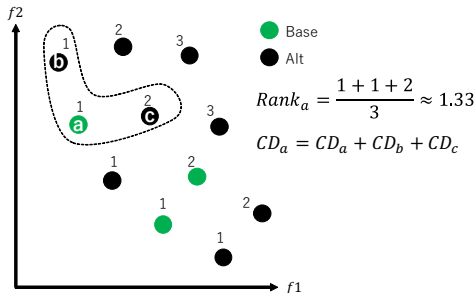


Fig. 4: Average Rank and total Crowding Distance

3.4 SharpDistance による一般化する解の調整

一般化の過程で基底解と代替解の評価値の差が大きく異なる場合，その代替解を一般化の対象から外すことを目的に Sharp Distance の概念を導入する．以下 Fig. 5 に Sharp Distance の概念図を示し，式 (1) に計算式を示す．

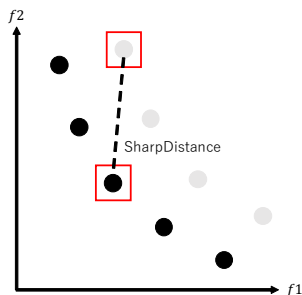


Fig. 5: Sharp Distance

SharpDistance は基底解と照合対象としている解の

一対一関係の距離を表す．その距離は母集団内での最大値と最小値の差が 1 になるように正規化して求める．ここで，#object は目的数， $Ind_{baseFit_i}$ は基底解の目的軸 i の評価値， Ind_{altFit_i} は代替解の目的軸 i の評価値， $maxFit_i$ ， $minFit_i$ は全ての代替解の中での目的軸 i における最大，最小評価値を示す．

$$SharpDistance = \sqrt{\sum_{i=1}^{\#object} \left(\frac{Ind_{basefit_i} - Ind_{altfit_i}}{maxFit_i - minFit_i} \right)^2} \quad (1)$$

式 (1) により求められた SharpDistance と，あらかじめ設定された閾値 θ_{SD} によって代替解を一般化するかどうかを決める．解空間において近い距離にある解，すなわち似たような評価値を持つ解を一般化するときは以下の条件を満たす．

$$SharpDistance \leq \theta_{SD} \quad (2)$$

一方で遠い距離にある解，すなわち 1 つの目的軸に特化する評価値を持つ解を一般化するときは以下の条件を満たす．

$$SharpDistance \geq \theta_{SD} \text{ かつ 互いに被支配関係} \quad (3)$$

4 従来手法の改良

4.1 路線と停車・通過の概念を導入した解表現

路線網とその運行形態の最適化をするため，NSGA-II で進化させる解に路線と停車・通過の概念を取り入れる．従来手法では，河川用バス路線を想定していたため路線の分岐がなく，路線と停留順は一意に定まり停留所を通る順番があらかじめ決まっていた．そのため，0/1 で停車と通過を表現することであたかも路線のようにふるまうことができた．しかし，どのバス停にどの順序で停車するかという観点から見ると路線という概念はなく，そのためバス路線網を表現できないという問題がある．そこで本研究では，Fig. 6 に示すように，解の中の数字でバス停番号を表し正/負の数で，それぞれその番号を停車/通過することで路線と運行形態を表現する．Fig. 6 は 4 つの路線から成る路線網とその運行形態を表現している．Line3 は 4 番を始点，9 番を終点とする路線であり負の数である 3,7,6 番を通過する．

LineNo	StopNumber								
Line1	0	1	2	5	7	6	9	13	12
Line2	1	3	11	10	9				
Line3	4	-3	5	-7	8	-6	9		
Line4	4	3	-5	-7	-6	9			

Fig. 6: solution expressing lines

4.2 新しい解表現における一般化方法と初期母集団生成方法

新しい解表現方法により，従来手法と改良手法では一般化する対象が異なる．以下 Fig. 7 に，改良手法の一般化方法を示す．従来手法の一般化対象は Fig. 3 が示すように 0/1 からなる binary 列であるが，改良手法では Fig. 7 の黄色部が示すような複数の路線からなる路線網を一般化対象とする．また，従来手法における

初期母集団はランダムに生成される binary 列であったのに対し、本研究では間島らの路線網構築手法を用いることによって最適化された路線網を初期母集団とする。この変更により良い初期条件から一般化と最適化を始めることが可能になる。

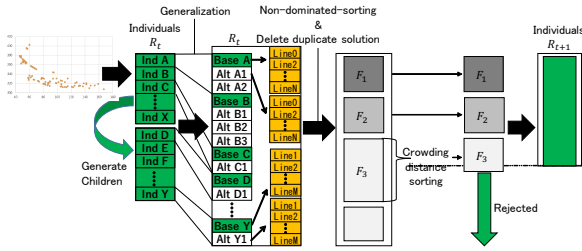


Fig. 7: New Architecture : Generalization and Optimization

一般化により獲得される代替解は基底解から停車と通過のみを変更するため、代替解と基底解は同じ路線網の形状を表現していなければならない。そのため解を一般化の際は、以下の3つの条件すべてを満たしているとき同じ路線網と判断し一般化の対象とする。以下 Fig. 8 に一般化条件を示す。

1. 構成路線数が同じである
2. 各路線に所属するバス停数が同じである (通過する停留所も所属に含める)
3. 各路線の始点および終点のバス停番号が照合対象と同じである

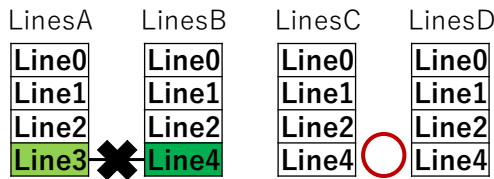


Fig. 8: Generalization condition

5 実験

5.1 実験設定

バス路線網を表現した Mandl のベンチマーク問題⁹⁾を用いて提案手法が生成する路線網と代替解の性能を比較する。以下 Fig. 9 にベンチマーク問題の物理的インフラネットワークを示す。Fig. 9 におけるノード番号はバス停番号を、リンクに添えられた数字はバスが時速 20km/h で走行した時にかかる時間を示している。また、以下 Table 1 に本実験で用いる停留所別の乗客の人数を表にした OD(origin destination) 表を示す。表中の行と列の停留所番号はそれぞれ出発地と目的地を表している。生成されるバス路線網の評価方法は、利用者の総移動時間を評価関数 $f1$ 、バス会社の必要バス台数を評価関数 $f2$ とし、それぞれの最小化を目的とする。

$$f1 = \sum_{L_k} B_{L_k}, f2 = \sum_{S_i \neq S_j} T_{S_i, S_j} D_{S_i, S_j} \quad (4)$$

ここで、 D_{S_i, S_j} は出発地を S_i 、目的地を S_j とする単位時間あたりに発生する乗客数である。 T_{S_i, S_j} は乗客

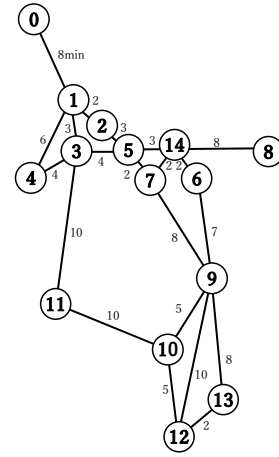


Fig. 9: The map of Mandl's problem

Table 1: OD Table

ST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
1	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
2	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
3	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
4	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
5	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
6	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
7	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
8	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
9	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
10	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
11	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
12	35	10	10	10	5	15	10	10	10	500	95	70	0	45	0
13	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	10	45	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

者の所要時間であり、移動時間だけでなく待ち時間や乗換時間も含まれる。 B_{L_k} は路線 L_k のバス台数である。また、パラメータは以下のようにし、バスに関するパラメータは既報の文献³⁾に従い設定した。

- バスと一般化に関するパラメータ
 - 定員：40 人
 - 速度：20km/h
 - 乗り換えにかかる所要時間：5 分/人
 - $\theta_{SD} = 0.1$
- 遺伝的アルゴリズムに関するパラメータ
 - 母集団サイズ：200
 - 世代数：500
 - 突然変異率：0.1

5.2 実験内容

- ケース 1
基底解が獲得する代替運行形態において、必要バス台数に変化が生じず rank 1 を維持した代替運行形態を獲得できるかを検証する。
- ケース 2
基底解が獲得する代替運行形態において、必要バス台数を減少させ rank1 を維持した代替運行形態を獲得できるかを検証する。

6 結果

6.1 ケース 1

以下 Table 2 に得られた代替解を示す。Table 2 を見ると、バス停の停車と通過の変更のみで、最適性 (rank1) を維持したまま 9 種の代替運行形態を獲得していることが分かる。なお、表中の 3.S#とは 3 番路線のそのバス停において停車と通過を反転させることを意味する。

Table 2: Base and Alternative solutions(case1)

BusStop	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	rank	(f1, f2)
Alt1			2.S#	3.S#	3.S#										1	(50, 3854)
Alt2							3.S#								1	(50, 3854)
Alt3							3.S#								1	(50, 3854)
Alt4						3.S#	3.S#								1	(50, 3854)
Alt5						3.S#	3.S#								1	(50, 3854)
Alt6			2.S#	3.S#	3.S#		3.S#			2.S#					1	(50, 3854)
Alt7							3.S#	3.S#							1	(50, 3854)
Alt8						2,3.S#	3.S#								1	(50, 3854)
Alt9						3.S#	3.S#								1	(50, 3854)
Alt10			2.S#								2.S#				13	(51, 3859)
Alt11						2,3.S#	3.S#	3.S#			2.S#				23	(50, 3929)

また、Fig. 10 に基底解と代替解 6(11 個のうち 6 番目の解)の路線網及び運行形態を示す。まず、基底解と代替解 6 の性能を見比べると、停車と通過を変更することのみによって、必要バス台数 50 台、乗客の総移動時間 3854 時間と全く同じ性能を実現する代替運行形態を獲得することができた。代替解 6 の運行形態は基底解と比べて、Line2(緑)の 10 番バス停と Line3(青)の 5 番バス停を通過し、Line2(緑)の 3 番バス停と Line3(青)の 7 番バス停に停車するように変更されている。これは 10 番と 5 番バス停を通過する代わりに 3 番と 7 番バス停に停車することで性能を維持できることを示しており、災害などで 10 番と 5 番バス停に停車できるバスエリアが縮小された場合に 3 番と 7 番に停車することで対応できることを示している。

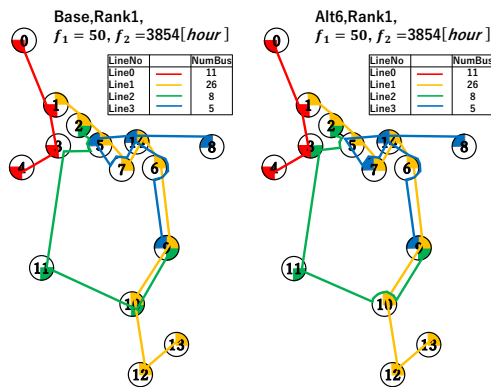


Fig. 10: Base and Alt6 lines

6.2 ケース 2

以下 Table 3 に得られた代替解を示す。Table 3 を見ると、バス停の停車と通過の変更のみで、最適性 (rank1) を維持したまま 5 種の代替運行形態を獲得していることが分かる。代替解 6 以降は rank が 1 ではないがその評価値 f_1, f_2 を見ると rank1 の解と比べて数十時間だけ乗客の総移動時間が増えているだけであり、これらも有用な解であると言える。

また、Fig. 11 に基底解と代替解 2 の路線網及び運行形態を示す。まず、基底解と代替解 2 の性能を見比べると、停車と通過を変更することのみによって、総移動時間は 10 時間増加するものの、バス台数を 1 台減らす

Table 3: Base and Alternative solutions(case2)

Bus Stop	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	rank	(f1, f2)
Alt1				2,3.S#			3.S#	3.S#							1	(56, 3641)
Alt2				2,3.S#											1	(56, 3641)
Alt3				3.S#			3.S#	3.S#							1	(56, 3641)
Alt4						2.S#	2,3.S#	2,3.S#							1	(56, 3641)
Alt5				2,3.S#			2.S#	3.S#	2,3.S#						1	(56, 3641)
Alt6							3.S#	2,3.S#							3	(56, 3675)
Alt7							3.S#	3.S#							4	(56, 3687)
Alt8				3.S#		2.S#	3.S#	3.S#							4	(56, 3687)
Alt9								3.S#							4	(56, 3687)
Alt10				2,3.S#		2.S#		3.S#							4	(56, 3687)
Alt11				2,3.S#		2.S#	3.S#								4	(56, 3687)
Alt12						2.S#	3.S#	2.S#							7	(56, 3704)

ことに成功している。代替解 2 の運行形態は基底解と比べて、Line2(緑)の 3 番バス停を通過する代わりに、Line3(青)で 3 番バス停に停車している。これは Line2 が負担していた 3 番バス停の乗客を Line3 が請け負うことで、バス台数を 1 台少なくできることを示している。バス会社がバス台数をなるべく抑えたいときにこの代替解 2 は有効であると言える。また本実験で使用している乗客の総数は 15570 人であるため、1 人あたり $10[\text{時間}] \div 15570[\text{人}] = 2.3[\text{秒}/\text{人}]$ の増加を許容するだけでバス台数を 1 台減らすことができる。しかしながら、本実験では一般化する解の距離を $\theta_{SD} = 0.1$ に設定しているため、大幅にバス台数を減少させる代替解は獲得していない。これはバス台数があまりにも減少してしまうと乗客の総移動時間の変化量が大きくなってしまったためである。

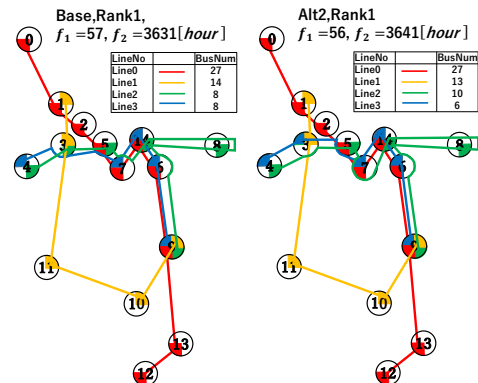


Fig. 11: Base and Alt2 lines with BusNum change

7 考察

6.1 の実験ケース 1 で得られた rank3 以下の一般化された解の分布を、Fig. 12 に示す。一般化された解とは基底解と代替解の関係を持っている解で、図中の結びつきはその関係であることを示している。rank1 の解だけではないため、最適解集合 (パレートフロント) ではないが形としてはパレートフロントを形成していることがわかる。また、図中にはプロットされた点の個数が 8 個しか見えないが、バス台数 50 台の解は Table 2 に示したように同じ評価値 f_1, f_2 を持つ解が基底解を含めると 10 個存在する。このように、多くの解が同じ評価値を持つため図にプロットすると重なり、全体として数個の解しか存在していないように見える。具体的には、バス台数 50 台で rank3 以下の解は全部で 35 個存在し、内訳として基底解 6 個、代替解 29 個が存在する。また、これら 35 個の解は全て固有のものであり、全く同じ解は存在しない。何故ならば、Fig. 2

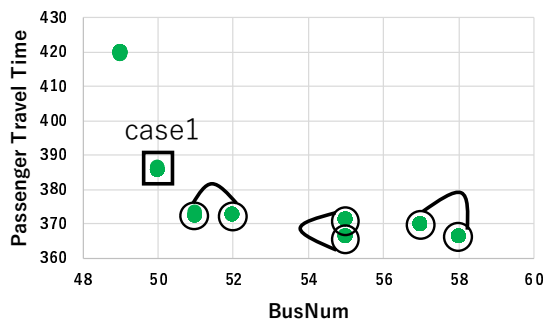


Fig. 12: Generalized solutions less than rank 3

のアーキテクチャが示すように進化の過程で重複解の削除機能を取り入れているため同じ基底解は1つとして存在しない。さらに各基底解の中では、路線網の形状が同じ解の中で、停車と通過を切り替えるだけのため基底解1の代替解と基底解2の代替解が同じ路線網を持つことはないからである。また、Fig. 12が示すバス台数51台と52台の解の関係を見ると、乗客の総移動時間をほぼ同じ状態で、使用できるバス台数を減少させる運行形態を獲得することにも成功した。

8 おわりに

本研究では、環境変化が生じた際に平時の路線網を維持しつつ環境変化に適応させる方法として、運行形態を一般化する手法を提案した。提案手法の有効性を検証するため、Mandlのベンチマーク問題を用いた路線網最適化シミュレーション実験により以下のことが明らかになった。(1) 平時の路線網に性能を維持した代替案である複数の運行形態を与えることができ、また(2) 路線網に必要なバス台数を減少させる代替運行形態を獲得することにも成功した。今後の課題として、災害発生前と発生後の2種類の乗客の需要を共に満たす路線網生成実験が挙げられる。

参考文献

- 1) 大野 恭司. 首都震災時の鉄道による帰宅行動がおよぼす危険性について. 運輸政策研究, Vol. 9, No. 4, pp. 79–84, 2007.
- 2) 国土交通省自動車交通局. 東日本大震災での自動車分野の対応(総括), 2012.
- 3) 間島 隆博, 高玉 圭樹, 渡部 大輔, 勝原 光治郎. ネットワーク成長, 修正モデルによる公共交通機関の路線網構築法. 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用 (TOM), Vol. 2, No. 2, pp. 92–102, 2009.
- 4) 北川 広登, 佐藤 圭二, 佐藤 寛之, 服部 聖彦, 高玉 圭樹. 災害時における道路寸断に対するバス路線網修正と最適化. 進化計算シンポジウム 2013, pp. 156–161, 2013.
- 5) Sayaka M, Takahiro J, Hiroto K, Keiki T, Takahiro M, Daisuke W, and Mitujiro K. Multi-agent-based bus route optimisation for restricting passenger traffic bottlenecks in disaster situations. *International Journal of Automation and Logistics*, Vol. 2, No. 1-2, pp. 153–177, 2016.

- 6) 高谷 美穂, 石井 晴之, 張 財立, 辰巳 嵩豊, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹. 帰宅困難者の滞留解消に向けた区間混雑に基づく路線間バス譲渡. 2018.
- 7) Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and Tamt Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197, 2002.
- 8) 佐藤 圭二, 佐藤 寛之, 高玉 圭樹. 環境変化に適応するためのピボット型一般化. 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 11, pp. 1020–1028, 2013.
- 9) Christoph E Mandl. Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, Vol. 5, No. 6, pp. 396–404, 1980.