

# 移動体の通過順序付けにおける最適化手法の比較評価

## A Comparison of Optimization Methods on Objects Ordering

澤田めぐみ† 白石将†  
Megumi Sawada Masashi Shiraiishi

尾崎敦夫† 松村寛夫‡  
Atsuo Ozaki Nobuo Matsumura

### 1. はじめに

複数の移動体が関与する交通システムでは、同一領域を移動体間で共有して通過することが多い。このような領域への入域点では、移動体間の通過順序付けが必要であり、一般に先着順方式が採用されることが多い。先着順方式は、移動体間の公平性が確保できるとの利点がある。しかし、先着順方式を適用する場合、先行する移動体に遅延が発生すると後続の移動体に遅延が伝播し、交通全体として大きな遅延が発生する危険性がある。そこで、公平性を大きく損なわない範囲内で先着順からの入替えを許容し、総遅延時間(全体の遅延)を最小化する順序入替え方式を提案している[1]。提案方式では、順序付けの決定に、最適化手法の1つである遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)[2]を用いている。GAは生物進化に基づく確率的なアルゴリズムであり、複数の解(個体群)を保持し、その個体群への交叉・突然変異・淘汰の遺伝的操作の適用を反復することにより、解の評価値を向上する方向に個体群を進化させる手法である。

本稿では、提案方式で利用する最適化手法として局所探索ベースの解法であるタブーサーチ(TS: Tabu Search)[2]を実装し、GA[2]との比較評価を行った結果を述べる。TSは、解を一つ保持し、その解を少し変化させた近傍解集合の最良解を選択することを繰り返すことで評価値の良い解の探索を行う。その際に、探索のループを防ぐため、選択した最近の解の生成方法に関する情報(タブー属性)をタブーリストに記憶し、一定期間、その属性を持つ解の選択を禁止する。このようにして、TSは局所最適解に陥ることを防ぎ、探索の多様化を図る。

### 2. 想定する交通モデル

本稿では、入出域点が各1点の共有領域(図1)を複数の移動体が通過するにあたり、出域時に指定の規定間隔を遵守する交通を想定する。ここで、規定間隔を満たすための調整法は、「共有領域における速度調整」と「待機場所の利用(定められた待機時間か、その整数倍の時間だけ、そこで待機可能とする)」があるものとする。

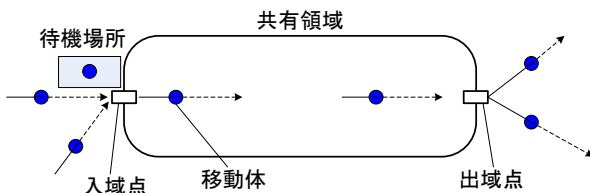


図1 想定する交通モデル

† 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所, Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.

‡ 三菱電機株式会社 インフォメーションシステム事業推進本部, Information Systems & Network Service Group, Mitsubishi Electric Corp.

### 3. 順序入替え方式

順序入替え方式は、移動体の共有領域への入域順序を、待機場所を利用して先着順から入れ替えることにより、遅延伝播を解消し、総遅延時間の最小化を図る方式である。この先着順入替えには最適化手法を利用しており、文献[1]ではGAを用いていたが、新たにTSも実装した。提案方式の処理の流れを以下に示す。

#### 処理の流れ

提案方式は、以下のループ処理を規定回数だけ繰り返し、評価値が最も良いスケジュールを採用する(図2)。

- (1)「移動体の順列」および対応する評価値に基づき、最適化手法を用いて、新たな順列を複数生成する。
- (2)スケジューラは、最適化手法が出力する各順列に関し、先頭の移動体から順に1台ずつ出域時刻を計算し、その時刻を時間軸上に割り当てていく。その際、スケジューリング済みの移動体との規定間隔制約を違反する場合は、待機場所を利用して当該移動体の入域時刻を遅らせ、再度、出域時刻の計算と割り当てを試みる。
- (3)生成された複数の移動体スケジュールのそれぞれの評価値を算出する。

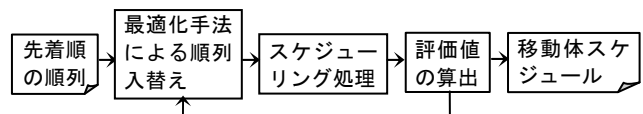


図2 順序入替え方式の処理の流れ

上記手順(3)において、移動体スケジュールの評価値は、公平性も考慮した総遅延時間の最小化を行うために、式(1)に示す評価関数を利用して算出する。

$$F = (\text{総遅延時間}) + \alpha \times (\text{公平性の損失}) \quad (1)$$

$\alpha$ : 最適化項目トレードオフ調整用パラメータ

式(1)中の公平性の損失は「先着順からの最大遅れ」として算出する。ここで「先着順からの最大遅れ」とは、各移動体における先着順での出域順序からの遅れの最大値を示す(例えば、先着順では2番目に出域予定であった移動体が、順序入替え方式で生成された移動体スケジュールでは5番目に出域予定となった場合は、先着順からの遅れは3となる)。また、式(1)に記載されている $\alpha$ は、最適化項目のトレードオフ調整用パラメータである。この $\alpha$ の値を大きくするほど、公平性を保つことを考慮する度合いが大きくなる。また、 $\alpha$ の値が0の場合は、総遅延時間のみを考慮した単一指標の最適化となる。

### 4. 評価

評価条件について述べた後に、評価結果を示す。

#### 評価条件

まず、評価シナリオについて述べる。ここで、時間は任意の単位における比率とする。移動体は全部で60台であり、入域点に時間間隔90で到達する。移動体の種類はA、

Bの2種類であり、図3に示す順序で入域点に到達する。そして、出域点で要請される移動体間の規定時間間隔は、連続する移動体の種類に応じて定まるものとし、表1のように、2つのシナリオを設定した(必要な規定間隔が大きいくらいほど、移動体間で遅延が伝播し易い状況となる)。また、待機時間は、1回の待機あたり240である。移動体が共有領域の移動に要する時間は830~920の範囲で調整可能とする。

入域点到達順序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
移動体種類	A	A	A	A	A	A	B	B	A	B	A	B	A	B	A	B	B	B	A	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	B
入域点到達順序	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
移動体種類	B	B	B	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	B	A	B	B	A	B	B

図3 2種類の移動体A, Bの入域点到達順序

表1 移動体の種類に応じた出域点での規定時間間隔

前方の移動体	後続する移動体	規定間隔	
		シナリオ1	シナリオ2
A	A	120	100
A	B	120	150
B	A	120	50
B	B	120	50

次に、GAとTSの評価パラメータを表2に示す。ここで、以下は、GAとTSどちらも同じ設定である。

- 解表現：移動体の順列(スケジューリング順序を示す)。
- ループ処理の終了条件：1000回。
- 各ループで生成する新たな順列(解)の個数：400個。

表2 GAとTSの評価パラメータ

GA	初期解集合	先着順、ランダムに生成した順列(複数)
	個体群	400個体を保持
	交叉	循環交叉(400個体生成)
	突然変異	逆位(突然変異率:0.01)
	淘汰	ルーレット選択およびエリート戦略(エリート数30)
TS	初期解	先着順
	近傍解の生成法	現在の解のスケジューリング順序をランダムに1組交換する(400個近傍解を生成)
	タブー属性	スケジューリング順序の交換位置の組(タブーリストサイズ:100)

評価結果

表3は、先着順方式と提案方式から得られた移動体スケジュールの式(1)で定義した評価値・総遅延時間・公平性の損失、および、提案方式における収束回数(最良解を得たループ回数)・処理時間(計算機環境 AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core Processor 4600+, 2.39 GHz, 2.12 GB RAMにて、

表3 各方式から得られた移動体スケジュールの評価値・総遅延時間・公平性の損失、および、提案方式における収束回数・処理時間

(a) シナリオ1

方式	評価値 F(式(1))		総遅延時間		公平性の損失		収束回数		処理時間[秒]		
	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS	
提案方式	最適化手法	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS
	$\alpha=0$	66510.3	<b>64812.1</b>	66510.3	<b>64812.1</b>	35.26	<b>33.64</b>	951.2	<b>898.9</b>	91.0	<b>55.5</b>
	$\alpha=100$	67116.1	<b>65003.2</b>	66279.8	<b>64213.2</b>	8.36	<b>7.90</b>	957.3	<b>836.2</b>	72.6	<b>45.1</b>
	$\alpha=1000$	71475.0	<b>69443.6</b>	67222.5	<b>65563.6</b>	4.25	<b>3.88</b>	895.1	<b>727.1</b>	68.6	<b>43.0</b>
	$\alpha=5000$	83264.2	<b>78712.9</b>	77809.6	<b>68862.9</b>	1.09	<b>1.97</b>	819.2	<b>653.0</b>	71.6	<b>42.0</b>
$\alpha=10000$	88808.3	<b>86259.9</b>	78808.3	<b>73759.9</b>	1.00	<b>1.25</b>	817.6	<b>363.6</b>	72.5	<b>42.1</b>	
先着順方式	139117.0		139117.0		0.00		—		—		

(b) シナリオ2

方式	評価値 F(式(1))		総遅延時間		公平性の損失		収束回数		処理時間[秒]		
	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS	
提案方式	最適化手法	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS	GA	TS
	$\alpha=0$	8164.9	<b>7421.6</b>	8164.9	<b>7421.6</b>	9.38	<b>8.92</b>	740.6	<b>562.5</b>	42.0	<b>23.6</b>
	$\alpha=100$	8560.7	<b>7930.0</b>	8011.2	<b>7438.0</b>	5.49	<b>4.92</b>	707.4	<b>591.1</b>	39.3	<b>23.2</b>
	$\alpha=1000$	11411.3	<b>10649.5</b>	8148.6	<b>7619.5</b>	3.26	<b>3.03</b>	747.5	<b>667.9</b>	33.6	<b>22.9</b>
	$\alpha=5000$	21011.9	<b>20373.3</b>	11011.9	<b>10373.3</b>	2.00	<b>2.00</b>	715.0	<b>652.0</b>	32.7	<b>21.5</b>
$\alpha=10000$	31072.9	<b>30156.7</b>	11072.9	<b>10156.7</b>	2.00	<b>2.00</b>	718.4	<b>673.5</b>	33.0	<b>21.5</b>	
先着順方式	51709.0		51709.0		0.00		—		—		

ループ処理を終了条件まで繰り返す処理時間)を示す。ここで、表3の提案方式の結果は、それぞれ100回試行の平均値である。表3から以下が確認された。

- GA, TS どちらを用いても、公平性を考慮する度合い( $\alpha$ )の増加に対する総遅延時間・公平性の損失の変化の傾向は同じであった( $\alpha$ を増加すると公平性の損失が改善され、 $\alpha$ がある程度大きくなるまでは、 $\alpha=0$ の場合の総遅延時間とほぼ同程度のままであった)。
- GA, TS どちらを用いても、提案方式は、先着順方式と比べ、総遅延時間を大幅に抑制した( $\alpha=10000$ の場合でも、GAは21~57%、TSは19~53%に抑制した)。
- TSは移動体スケジュールの評価値がGAより優れていた。この際に、総遅延時間・公平性の損失も、概ねTSの方が優れていた(シナリオ1において $\alpha>5000$ の際に、TSは、GAと比べ、総遅延時間が優れているものの、公平性の損失が劣る場合があった)。また、TSは、収束回数、処理時間に関してもGAより優れていた。

以上より、本問題に関し、TSは、探索性能(得られる解の質、収束回数、処理時間)がGAよりも優れていることが分かった。これは、本問題に関しては、先着順に近い順列に基づいてスケジューリングした結果が高評価値となる傾向があり、かつ、TSではそのような解を効率良く探索していたためと考えられる。また、処理時間がTSの方が優れていたことに関しては、TSの処理内容(解の生成等)がGAより単純であることが主要因と考えられる。

5. おわりに

交通システムのための提案の順序入替え方式において順序決定に利用する最適化手法として、GAとTSの比較評価を行った。その結果、提案方式では、GAよりもTSによる探索が適していることが分かった。

参考文献

[1] 澤田めぐみ, 白石将, 尾崎敦夫, 松村寛夫, “移動体の通過順序付けにおける公平性を考慮した遅延最小化,” 情報処理学会, 第73回全国大会公講演論文集, P1-273, 2011.

[2] 白石洋一: 組合せ最適化アルゴリズムの最新手法, 丸善, 2002.