GAを用いた複数モードのスケジューリング*

Application of GA Method to Multiple Modes Scheduling

浦田康滋**、有村幹治*** 田村 亨****、梶谷 有三*****、斉藤 和夫*****

by Kouji URATA **, Mikiharu ARIMURA *** ,Tohru TAMURA **** , Yusou MASUYA ***** , Kazuo SAITO *****

1 はじめに

近年、ヨーロッパでは、鉄道と航空ネットワークの連携が注目されている。わが国においても、羽田、成田の容量制約を解決するために、例えば新潟空港と首都圏を新幹線鉄道で直結し空港連携を行って、空港の容量を確保するという議論がある。しかし、異種間ネットワークの連携を扱った研究は、これまでにあまりなされていない。その理由は、各モードがそれぞれ違う制約条件をもっていること、各モードのスケジュールが他のモードに互いに影響して定まりにくいこと、各モードのスケジュールの組合わせと2種類のモードの組合わせによって全体のスケジュールの組合わせ数が膨大な数になるため、解の探索が困難なこと、である。本研究は、制約条件の多い複合モードのスケジューリング問題にGAを適用したものであり、ケーススタディを通して、構築した手法の有効性を確認することと、GA適用上の課題を整理することを目的とする。

本研究で対象とする鉄道航空機の連携については交通搬具の輸送力にそもそもの差があり、実際には、千歳空港の年間輸送量1000万人(1日約3万人)を越える大空港が対象となろう。その場合、航空機の運用は、一様に分布していると仮定してもよいと考えられ、異種モードのスケジュールを同時に解く必要性は無いと考えられがちである。しかし、“ルフトハンザ” エクスプレスが行った、ドイツのフランクフルト～ジュセルドルフ間の運賃の相互乗り入れを含めた運行を考える場合など、交通供給者にとっては、スケジュール問題は重要な検討課題である。本研究は鉄道と空港のスケジ

ュール連結を対象として分析している。なお、スケジュール問題にGAを使った研究は、貨物列車のダイヤグラム²⁾などに既になされている。

2 線列とそれを構成する遺伝子の設計

本研究は、航空や鉄道等の異種ネットワークが連携する際に、異種間のスケジュールを全体のスケジュールとして最適化するものである。GAを連携スケジュール問題に適用するとき問題になるのは、スケジュールという時間と空間で構成される情報を、いかにGAに与えるか、具体的には、GAの初期プロセスで与えられるランダムな値を持つ線列に、いかに各スケジュールの持つ異なる条件(ネットワークが決められている場合の交通搬具数、ルート数、待機時間等)の情報(遺伝子)を当てはめるかにある。これらの条件数が増えるほど、全体のスケジュールを組む際に、その組み合わせ数は爆発的に増加する。

(1) 機材・列車など交通搬具の設計

1本の線列に、複数の交通搬具の情報を取り込むことで、複数モードのスケジューリングが可能となる。その概念図は図1に示すとおりである。

図-1 交通搬具の設計

(2) 運行ルートの設計

① 遺伝子の設計

本研究では、線列を構成する遺伝子に各モードの運

* キーワーズ: 交通制御、交通管理、公共交通運用、空港管理

** 正員 北海道開発コンサルタント(株)

、*、***** 学生員、正員 室蘭工業大学

(室蘭市水元町 27-1 Tel 0143-47-3419)

***** 正員 専修大学北海道短期大学

行ルートを考えた。例えば、航空ネットワークが図-5に示すハブ&スポーク型をしている場合、空港1-2-1を巡回するルートをルートA、空港1-3-1をルートBなどである。具体的な線列と遺伝子の関係を示すと、まず、ランダムに与えられる2進数の線列を任意のBit数で区切り、10進法に直し、遺伝子とし、各交通搬具に振り分ける(①の作業)。そして、各機材・列車に振り分けられた遺伝子をルート情報として意味付ける(②-④の作業)。例えば、4Bitの場合16種類の遺伝子が与えられるが、それを図5の航空ネットワークに適用する場合は、図2の様に振り分けることとなる。よって、遺伝子の番号が同じでも、鉄道と航空において、運行ルートの持つ意味は異なる。

飛行ルート

ルートA	0	4	8	12
ルートB	1	5	9	13
ルートC	2	6	10	14
ルートD	3	7	11	15

図-2 飛行ルートの設計

②運行に関する制約条件の内生化

GAは、確率的最適化手法であるため、制約条件や、後述する致死遺伝子をできるだけ生じさせない様に、問題を定式化することが重要である。本研究では、運行時間制約をGAの中に取り込む工夫をした。具体的には、例えば航空機1の運行ルートを示す「線列の部分」には、1日で運行可能な最大ルート数分の遺伝子の箱を用意し、目的関数の計算段階で航空機1の運行時間を加算して行き、終業時間を越える前の遺伝子の箱までしか運行ルートとして認めない方法を取った。これにより、図-3に示す様に、遺伝子の箱は用意されているものの、実際には使われることのない(意味の持たない)遺伝子が発生する。一般に、これを致死遺伝子と呼ぶが、線列を切断することは、使われない

Air 1	6	5	0	13	8	・
	2	5	5	2	1	7
	3	3	10	15	4	2
Rail1	5	10	6	8	5	・
	2	11	13	9	11	3

始業時間 ← → 終業時間

図-3 線列の切断と致死遺伝子

余分な遺伝子を線列に含ませることになるので、でき

るだけ致死遺伝子が発生しないように、各モードの運行時間帯と拠点間の運行時間の関係より、線列を設計する必要が生じる。

(3) ターミナルでの乗継ぎ待機時間等の設計

複数モードのスケジューリングで重要なことは、乗り継ぎターミナルでの乗換え抵抗である。ここでは、単純に、乗継ぎ待ち時間によってそれが長くなるに従って、移動予定者の行動回避が高まるとして、目的関数の計算を行っている。この乗継ぎ待ち時間は、スケジューリング上は、機材の待機時間と運行時間によって設定される。運行時間は(2)の作業で一律に決まるため、問題となるのは、ターミナルでの待機時間であり、例えば、ハブ&スポーク型航空ネットワークの場合、ハブ空港とスポーク空港での時間調整待ちとして与えられる。この要因を遺伝子情報にすることは、(2)のルート設定の中に、待ち時間を導入すればよい。具体的には、待機時間として、a, b, c, dの4種類を考えた場合、図4の様に、運行ルートと待ち時間の16種類の組み合わせを設定できる。勿論、これは、鉄道ネットワークについても同様に設定できる。

待ち時間 飛行ルート	待ちa	待ちb	待ちc	待ちd
ルートA	0	4	8	12
ルートB	1	5	9	13
ルートC	2	6	10	14
ルートD	3	7	11	15

図-4 待機時間の設計

3 GAの定式化と解法手順

(1) 目的関数の設定

目的関数は、機材・列車の運行により、輸送できた人数を最大化するものである。なお、運行ダイヤにより、変化する利用客数は、方面別の潜在需要と待ち時間の関係から算出する¹⁾。すなわち、

$$P_s = \sum_t M_t s$$

$$M_t s = M_t \times R_t s$$

$$R_t s = 1 - |t - s| \times K_s$$

P_s : 時刻s出発の便の旅客数

$M_t s$: 時刻tを希望する人で時刻sの便を利用可能な

人数

Rts : 時刻 t を希望する人で時刻 s の便を利用する

割合

t : 出発希望時刻

s : 出発時刻

Ks : 1 時間ずれるとその便を利用しなくなる割合

(本研究では 0.66 としている)

航空機から鉄道への乗り継ぎ時だけ乗り継ぎ抵抗があるものと仮定し、乗り継ぎ時間が長くなるほど他の競合アクセス交通を選択して比例的に利用客が減少するものとした。

目的関数の設定として、乗継ぎ抵抗の最小化も考えられるがこれは、今後の研究課題である。また、先に述べた様に、本分析では、制約条件を線列の中に全て組み込んでおり、設定していない。

(2) ネットワークにおける目的関数算出の手順

各モードのスケジュールを時系列にそって重ね合わせることで、1 つの複合ダイヤが生まれる。時系列の早い方からモード間の「乗り継ぎ」を考慮に入れつつ、計算を行う。「乗り継ぎ客」は各モードのネットワークが連結する部分で発生し、客数は乗り継ぐ時間前に乗っていたモードのスケジュールに依存する。

その為、各モードの各便の利用客と乗り継ぎ客のモード間の引き渡しを時系列に沿って同時に処理する必要がある。そこで、拠点数と運行時間帯で構成されるマトリクスを作り処理する。まず、図-5 のように各ネットワークをマトリクス化する。

図-5 ネットワークのマトリクス化

図-5 では連結する部分を 1、しない部分を 0 で示している。このマトリクスを各モードの始業時間から終了時間まで運行時間帯に合わせて 3 次元化し、線列のスケジュール情報により、利用者数、便数を埋めて

いく(図-6)。この際に、モード間の乗り継ぎ時の(図-6 の場合は拠点 1) の客の挙動として、乗り継ぎ時間が長くなればなるほど、比例的に鉄道以外の他の競合交通機関を選択ものとする。

図-6 時系列処理

以上を順次時系列処理しながら、終業時間まで計算し目的関数を得る。

(3) GA の解法手順

複数モードのスケジュール最適化における、GA の線列解法の手順を、以下に示す。

- 1) 生成された 1 つの線列を任意の Bit 数で区切り、各モードの機材数に分ける。
- 2) 各モードに振り分けられた遺伝子に、ルートや待ち時間を設計変数として組み合わせ、1 日の始発と終着の各運行時間にあわせ線列を切る。
- 3) 各モードのスケジュールを時系列にそって重ね合わせる。この時点で 1 つの複合ダイヤが生まれる。
- 4) 時系列の早い方から、その便の利用者数を計算する。モード間を乗り継ぐ旅客は、その便の利用者よりモードの連結点(本研究ではハブ空港)での需要を得て、乗り継ぎ後の旅客数数を計算する。
- 5) 終着便までの利用者数を計算し、1 日の総輸送人数(目的関数)を得る。

以上の解析で目的関数を計算し、最適解を探索する。

なお、交叉確率と、突然変異生起確率の与え方、計算打ち切り基準については、これまでの経験を基に決定し、具体的な値は、ケーススタディで示す。

4 設計変数改良の可能性

遺伝子に情報を与えるときに、設計変数の値を大きくとり、自由度を高めることは解の探索空間を大きく

とることができる一方、計算時間が莫大なものになる危険性がある。また逆に設計変数の取り方次第で同じ問題を短時間で解くことも可能となる。本研究では、1本の線列を交通搬具数分に分けて情報を与えたが、1つの遺伝子に複数搬具とその運行ルートとを組み合わせることで、線列の長さを短くすることも可能である。例えば航空の場合、同時に同じ箇所に機材が飛ばないという条件が成立する場合、4つの飛行ルートに2機材が運行する場合は12個の遺伝子があればよく(図-7)、3機材が運行する場合は24個の遺伝子があれば設計できる。このように線列の設計と遺伝子の組み方によって、1つの線列で、多くの情報を表すことができる。また、図-7の場合は致死遺伝子が4つあるが、対角要素については機材2が別ルートEに飛行する等の意味付けをすれば、致死遺伝子は表れない。

		機材1			
機材2	飛行ルート	ルートA	ルートB	ルートC	ルートD
	ルートA	0	4	8	12
	ルートB	1	5	9	13
	ルートC	2	6	10	14
	ルートD	3	7	11	15

線列: 1・6・9・13・

機材1 A→B→C→D→・・・
機材2 B→C→B→B→・・・

図-7 遺伝子情報の別例

この様に、いかに制約条件を効率よく線列に盛り込むかが、解空間の効率的な移動、収束に影響し、結局、計算時間の短縮化と最適解の値に表れると考えられる。

5 ケーススタディ

簡単な条件で、図-8のネットワークを用いて連携スケジュールを検討した。航空機の機材数を1機から4機とし、定員数は25人/機とし、運行時間は8時～18時とする。鉄道の列車数は1台とし、定員数は100人/台とし、運行時刻は7時～20時とする。航空機はハブ空港から始発しハブ空港に到着するものとする。列車は大都市を始発し大都市に到着するものとする。

GA上のパラメータは人口サイズを10として、線列長を200、線列を構成する遺伝子を50(4Bitで1変数)とした。これは、スケジューリングされる機材と列車の1日の組み合わせ可能な最大値によって設定した。

図-8 仮想ネットワーク

図-9 航空機4機と列車1台の連携ダイヤ

GAで設定した諸操作変数は、1点交叉法の生起確率0.7、突然変異の生起確率0.1とし、打ち切り基準は20世代に渡り線列が更新されないか、100世代までとした。

図-9は、航空機4機と列車1台について、最良解を与えた場合の結果を示したものである。計算時間は富士通M780を用いて150秒であった。

GAの収束状況を示したのが、図-10である。これより、突然変異の発生(55世代)とその後の人口サイズ中の平均値、最大値の向上がわかる。

図-10 解の収束状況

6 GAの適用上の課題

(1) 問題の所在

土木計画的分野において、組み合わせ最適が有効に用いることができる問題としては、スケジューリング問題と配置問題が挙げられる。GAは、そのような最適化問題において、比較的良好な解を短時間で見つけることができると考えられている³⁾。これを証明する理論的研究はあまり進んでないが、一般の最適化と特に異なる点は、一点探索でなく、解候補の集団を扱った多点探索であること、個体の適応度に基づく確率的なプロセスで局所解を回避すること⁴⁾、である。一方、経験的研究の興味の多くは如何に局所解に陥らないか、あるいは、如何に局所解から脱出するかであり、このような「解の安定性」に関わる研究についても、すでに研究がなされている。その方策として有効なものは次の5つとされている⁵⁾。

- ①集団サイズを十分大きくとる。
- ②初期段階で突然変異の確率を大きくとる。
- ③適応度のバラツキを平準化するためにスケールングを行う。
- ④適応度を序数的に利用する。
- ⑤世代ギャップを小さくするように制御する。

本研究は、①②③については考察している。しかし、基本的にこれらの方策はすべてGAの特徴である確率的近似解法の枠を出たものではなく、本章で問題提起する事柄は、この枠を出た方策も検討するべきであるという提案である。

経験的にGAを設計・使用する際の問題点は2つある。1つは線列のランダム性である。GAは定義された空間に全くランダムに初期世代を生成させる。最適探索の出発点は、探索空間の全域にほぼ一様分布されている。分析対象に関する情報が全くない場合には、やむを得ないことであるが、解の探索過程を見ると最適解から遥かに遠い部分の探索が多過ぎることが分かっている。この場合は、交叉によって良い線列を生成する確率は低く、それまでに生成された良い線列が破壊されてしまうことが多い。

他の1つは、線列中のあるビットから特定の遺伝子が失われる(missing gene)ことについてである。GAでは、進化シミュレーションの開始当初は、線列集団にまだ明確な方向性はないが、探索が進むにつれて、

線列集団が収束に向かいつつある段階では、各線列の中に共通する部分が徐々に多くなっていくために、シミュレーション開始時点とは逆に、より局所探索を行うことになる。すなわち、淘汰、交叉によって、集団の中に含まれていた無意味な部分を取り除き、線列間の情報も交換しながら、ある方向に向けて、より詳細に局所的な探索を行うことである。解の探索過程を見ても分かることは、この当然起こるべきmissing geneの発生が遅いことである。

(2) 課題

一般にGAでは、線列の多様性が安定的な解を得るための必須条件⁶⁾、とされている。しかし、例えば交通量制御等の短時間で最適解を得る必要のある場合、収束性の向上は重要な課題となる。

GAの課題を一言でいうと何らかの情報によって線列を改良することである。すなわち容易に利用できる情報(知識ベース)とGAのハイブリット化である。

図-11 知識ベースとの融合

その方法として、以下の方法が考えられる。

- ①線列の設計時に、設計変数の示す情報そのものを経験的に複合化する。
- ②初期線列の生成時に、人口サイズの何割かに経験的に良好と思われる線列を導入する。
- ③集団の中に含まれた不特定な部分を取り除き、かつ探索を最適解がありそうな区域に早く移動させること、つまり、適応関数値の下限値を設定し、この下限値に達していない線列については繁殖・淘汰の前に線列をある確率で経験的に改良する。
- ④世代交代時に数世代変化しない設計変数群を恣意的に固定化し、突然変異をその群の中では発生させない。

これらの方法によって、GAの有効性を向上できるも

のと考える。図-11は上記①～④に対応させた、ハイブリット化方策をまとめたものである。

6 おわりに

本研究は、遺伝的アルゴリズムを複数モードのスケジューリングに適用し、以下の点を工夫したことで、GAの特徴を生かしながら分析が可能となった。

①1つの線路の中に、複数の機材と列車を割り振ることで、機材と列車の運行を同時に考えた最適化を行った。

②遺伝子(設計変数)として、機材・列車の運行ルートを考えることで、運行にかかわる制約条件を内生化できた。

③モード間の乗り継ぎについて、ハブ空港での待ち時間を変数として、スケジューリングの評価を行った。また本研究はスケジュール問題にGAを適用する上での課題を整理し、特に知識ベースとGAのハイブリット化の必要性を論じた。

今後の研究課題は本来GAの適用が優れているとされる大規模ネットワークでの解析を試みることである。

GAを用いた複数モードのスケジューリング

なお、本研究は文部省科学研究費補助金研究一般研究(C):06650580の補助を受けて進めた。

<参考文献>

- 1)田村亨・稲野茂地域航空における機材の最適スケジュール:土木計画学研究・論文集5(1987)
- 2)Gabbert P.S., Brown D.E., Huntley C.L., Markowicz B.P., Sappington D.E.: A System For Learning Routes and Schedules with Genetic Algorithms, Proceedings of The Forth International Confence on Genetic Algorithms, pp.430-438, 1991. Jure
- 3)Hajela, P: Genetic Search Approach to the Nonconvex Optimization Problem, AIAA J., Vol. 28, No. 7, pp1205-1210, 1990.
- 4)Halland J.H: Adaptation in Natural and Artificial Systems, Univ. Michigan Press, 1975
- 5)小林重信: 遺伝的アルゴリズムの現状と展望, 計測自動制御学会第4回知能工学部会特別講演資料, 1992. 3
- 6)計測と制御「特集 遺伝的アルゴリズム」, Vol. 32, No1, 1993

浦田康滋、有村幹治、田村 亨、梶谷 有三、斉藤 和夫

本研究は、繁殖・淘汰、交叉、突然変異をオペレーターとする遺伝的アルゴリズムを、①各モードがそれぞれ違う制約条件をもっている、②各モードのスケジュールが他のモードに互いに影響して定まりにくい、③各モードのスケジュールの組合わせと2種類のモードの組合わせによって全体のスケジュールの組合わせ数が膨大な数になるため、解の探索が困難、などの制約条件の多い複合モードのスケジューリング問題に適用したものである。ケーススタディを通して、構築した手法の有効性を確認することと、GA適応上の課題を整理することを目的とする。その結果、GAはより大規模なネットワークにも効果的である。

Application of GA Method to Multiple Modes Scheduling

by Kouji URATA, Mikiharu ARIMURA, Tohru TAMURA, Yusou MASUYA, Kazuo SAITO

Genetic Algorithms(GA) includes generally three genetic operators, selection, crossover and mutation. The lack of dependence on function gradients makes it more suitable to such problems, like as discrete optimization design problems and optimization design problems with non-convexities or disjointness in design space. The method is tried to apply to the Multiple Models Scheduling in this paper. The results suggest that GA is more effective for the optimization of large size Airline and Railway networks.