

多目的 GA を用いた麻酔医不足に対応した
手術スケジューリング手法の検討
Surgery Scheduling Method to Address the Shortage of Anesthesiologists
Using Multi-objective Genetic Algorithm

立石 隆浩[†] 杉本 千佳[†]
Takahiro Tateishi Chika Sugimoto

1. はじめに

手術スケジュールの作成は、勤務上の制約や医師それぞれの熟練度の違いによる制約など、多数の競合する制約条件のもとで最適なスケジュールを構築しなければならない多目的最適化問題であるため、スケジュール作成には労力と時間と経験を要する[1]。また、実際の医療現場では手術の延長や緊急手術の追加などによる手術スケジュールの変更があるため、再スケジューリング可能な計算時間が短く実用的なスケジューリング手法が求められる。そこで、多点探索であるため探索時間を短縮でき、局所解に陥りにくい性質を持つ遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を多目的最適化問題に適応させた多目的 GA の中でも、多様なパレート最適解集合を得られる非優越ソート遺伝的アルゴリズム(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II: NSGA-II) [2][3]を用いた手術スケジューリング手法を提案する。

手術において麻酔の適切な管理は必要不可欠であり、麻酔医を手術に適切に配置することは重要である。しかし、麻酔医が不足している病院は多く、手術の安全性を確保するためには、麻酔医を効率的に手術に割り当てるが必要となる[4]。そこで本論文では、安全性を確保した上で麻酔医の効率的な割り当てを可能にする手術スケジューリング手法を構築する。本論文の手術スケジュールでは、一人の麻酔医が複数の手術を並行して受け持つことを可能とし、安全性を確保するための制約条件として、ある患者の前処置あるいは覚醒処置は、別の患者の麻酔維持中にのみ同時に行えることとする。しかし、麻酔医の担当する手術の並列化により時間を効率化すればするほど、手術の時間間隔は短くなり、麻酔医の負担が増え、安全性が失われてしまう。よって、手術を麻酔医の技量に合わせて担当手術を手術担当時間やその手術の難易度を考慮した上で適切に割り振り、時間的に効率の良い勤務スケジュールを作成する。

本論文では、実際の手術を想定した問題設定に対し、提案アルゴリズムによって導出されるスケジュールを評価し、評価指標の設定に応じた適切なスケジューリングが可能であることを示す。

2. 多目的 GA による手術スケジューリング手法

2.1 スケジューリングの構成

提案アルゴリズムでは、手術スケジューリング問題を、複数の手術をどの日にどの麻酔医に担当させるかを適切に決定する「手術割り振り段階」と、割り振られた 1 日分の手術を最適に時間配置する「手術時間決定段階」の 2 つの

段階に分ける。「手術割り振り段階」では、各麻酔医に対して時間的に公平に割り振る事が出来たかを表す“時間的均等性”と、各麻酔医の技量に合わせてリスク・難易度を考慮して割り振ることができたかを表す“危険度均等性”の二つの評価指標の多目的最適化問題と捉える。「手術時間決定段階」では、効率よく勤務を割り当てることにより得られる空き時間を表す“効率度”と、各手術の危険度確率分布の重なり具合により算出される“安全度”の、トレードオフの関係にある二つの評価指標の多目的最適化問題と捉える。各段階について、パレート最適解集合を得るための多目的 GA で構成する。

2.2 GA における手術情報の表現方法

手術スケジュールは、一日の勤務時間の開始時刻から終了時刻までを 1 分ごとの遺伝子からなる遺伝子列で表現する。各遺伝子には、図 1 で示すように手術における麻酔医の主な処置情報である「前処置」「麻酔維持」「覚醒」「空き時間」の情報を割り当てる。これらの遺伝子を時系列で並べることで手術における麻酔医のスケジュールを表現する。また、遺伝子列に手術状況の情報だけでなく、手術情報に応じた手術の危険度を表す情報を持たせる。手術毎に危険が発生しやすい状況を示すために、時間的に変化するリスクの大きさを危険度確率分布モデルとして表現する。



図 1 遺伝子の表現

2.3 手術割り当て方法

各麻酔医に対して手術を公平に割り当てるため、手術割り当ての評価指標として、“時間均等性”と“危険度均等性”の 2 つの値を定義する。1 日に一人の医師に割り当てる手術を手術セットとし、時間均等性は手術セット間での総手術時間の分散とする。危険度均等性は、手術セット間での危険度確率分布値の累積値の分散の値を用いる。時間均等性と危険度均等性は以下の式より導出する。この 2 つの値を最小化するように淘汰を行い、最適解集合が求められるように集団を進化させていく。

$$\text{時間均等性} = \frac{\sum(\text{surgerytime}(i) - \text{meantime})^2}{n}$$

$$\text{危険度均等性} = \frac{\sum(\text{surgerydanger}(i) - \text{meandanger})^2}{n}$$

[†] 横浜国立大学 Yokohama National University

- n : 1人の医師が1日に担当する手術セット数
 - surgerytime(i) : 手術セットiの総手術時間
 - meantime : すべての手術セットの総手術時間の平均値
 - surgerydanger(i) : 手術セットiの総危険度
 - meandanger : すべての手術セットの総危険度の平均値
- 手術セットiの総危険度 surgerydanger(i)は、手術セットiにm件の手術が含まれている場合は以下の式で表現する。

$$\text{surgerydanger}(i) = \sum_{k=1}^m \int_0^t \{ \text{riskdistribution}(k,t) + \alpha \} dt$$

- riskdistribution(k,t) : 手術kの時刻tにおける危険度確率分布値
- α : 麻酔医ごとの危険度確率分布値に対する補正值

熟練度の高い医師と低い医師に対して手術を割り当てる際にはその熟練度の差を考慮して公平に手術を割り当てる必要性が生じるため、図2のように危険度確率分布値に対する補正值αを導入する。この補正值により、熟練度の低い医師に手術が割り振られた場合、その危険度を高いと見なして評価できる。その結果として、比較的熟練度の高い医師には難易度の高い手術を、逆に熟練度の低い医師には難易度の低い手術を割り当てるのが可能になる。

遺伝的操作について、交叉においては図4のように一つの手術の時間を交換させ、突然変異においては図5のように手術時間のシフトで表現した。

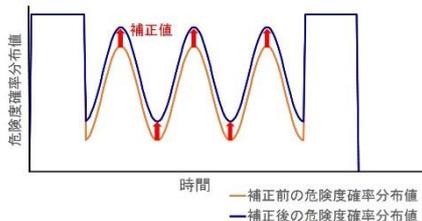


図2 危険度確率分布値の補正值

2.4 手術時間決定方法

麻酔医の作業の効率化と、それに伴う手術並列作業に対する麻酔医への負担の両方を考慮したスケジューリングのための評価指標として、麻酔医が手術を単体でこなすよりも並列でこなした方がどれだけ時間を短縮できたかを表現する手術の「効率度」と、手術の並行化による麻酔医への負担と手術スケジュール全体のリスクを考慮した、手術の安全性を表現する手術の「安全度」の2つの値を定義する。これらの値を各個体から算出するための式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{効率度} &= \text{手術並行化によって短縮された時間} \\ &= (\text{医師の1日に担当する手術時間の和}) \\ &\quad - (\text{医師の1日の実際の勤務時間}) \end{aligned}$$

$$\text{安全度} = \frac{\sum(\text{並行時の危険度確率分布値}) - (\text{危険度確率分布値の平均値})^2}{(\text{手術並行時間})}$$

非優越ソートの際に用いる2つの目的関数軸には、「効率度」と「安全度」を用いる。制約条件として、異なる手術間で「前処置」と「覚醒」が同一時間に重複しないようにスケジュールを作成しなければならない。そこで、以下のペナルティ値 penalty を導入する(図3)。

$$\text{penalty} = \text{異なる手術の「前処置」と「覚醒」が重なった時間}$$

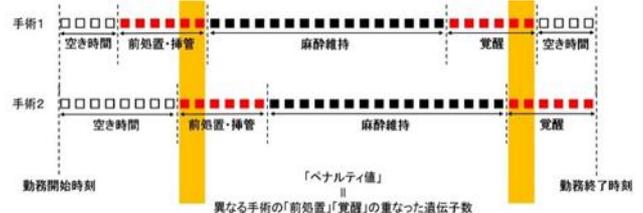


図3 ペナルティ値の導入

麻酔医の勤務スケジュールとして有用なものであるためには、penalty=0が条件となる。ランダムに生成されたスケジュールで penalty=0 が得られない場合は、penaltyの値が低い個体を優れたスケジュールとみなした上で、選択を行う。選択の際には、非優越ソートと混雑距離計算の結果から生存個体を決定する混雑度トーナメント選択の上位を次世代に残すようにした。

遺伝的操作について、交叉においては図4のように一つの手術の時間を交換させ、突然変異においては図5のように手術時間のシフトで表現した。

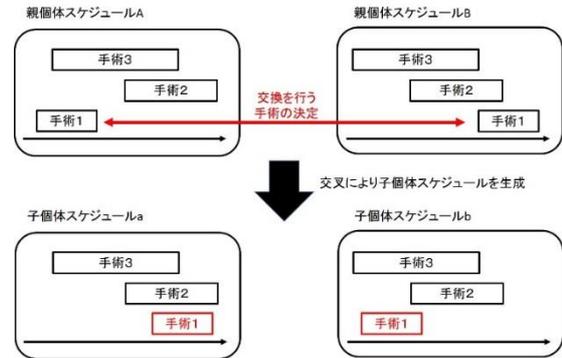


図4 交叉の表現

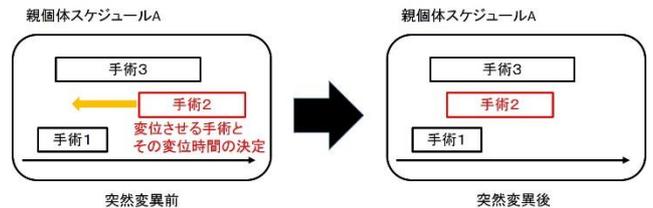


図5 突然変異の表現

3. シミュレーション評価

提案アルゴリズムをシミュレーションにより評価した。

3.1 手術スケジュール設定

熟練度に差のある麻酔医2人による2日間の手術スケジュール作成を想定し、1人の麻酔医が1日最大3つの手術を担当できるように12件の手術を用意した。割り振る手術を表1に示す。手術の難易度として低・中・高の3つの危険度で設定し、ここでは簡易化のため、図6で示すように、手術スケジュールの麻酔維持段階で切開・手術・縫合の3つのピークがあるように設定してピークの値を危険度に応じて変化させた。また、麻酔医Aが麻酔医Bより熟練度が高く、麻酔医の熟練度の差をあらわすための補正值を0.2とした。また、より大規模なスケジュールリングとして、45件の手術を用意し、熟練度に差のある麻酔医C, D, E

(熟練度 $C > D > E$ とする) の3人による平日5日間の手術スケジュール作成を行った. 補正值としては麻酔医 D に 0.2, 麻酔医 E に 0.4 を与えた.

表1 割り当てる手術の情報

手術	前処置	麻酔維持	覚醒	総時間	危険度
1	20	80	20	120	低
2	20	80	20	120	高
3	30	120	30	180	低
4	30	120	30	180	中
5	30	120	30	180	高
6	30	150	30	210	中
7	30	170	40	240	中
8	30	170	40	240	高
9	30	270	40	270	中
10	40	220	40	300	低
11	40	220	40	300	高
12	40	250	40	330	中

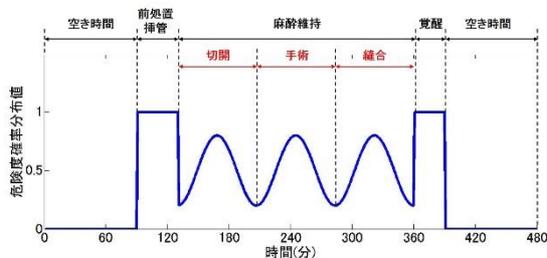


図6 危険度確率分布の表現の例

3.2 シミュレーション結果

提案アルゴリズムによって得られた手術割り当てのパレート最適解集合分布を図7に示す. 図7より, 4つの最適解が得られたことが分かる. 全探索法により導出した手術割り当て最適解とこれらの4つのパレート最適解を比較したところ, 完全に一致する結果となった. その4つのパレート最適解への提案アルゴリズムの学習過程について, 50回試行の平均特性を図8に示す. 平均特性として, 世代交代数5000回では3.88個, 10000回では3.96個の最適解が得られた. その4つのパレート最適解による手術割り振り結果を表2に示す. また, その割り振られた麻酔医1人ごとの1日の手術スケジュールの総時間と総危険度を図9に示す. 表2および図9中におけるA1,A2,B1,B2はそれぞれ, 麻酔医A,Bの1日目, 2日目の値を示す. 時間的均等性を優先した手術割り振りや, 麻酔医の熟練度に応じた危険度均等性を優先した手術割り振りを行うことができています.

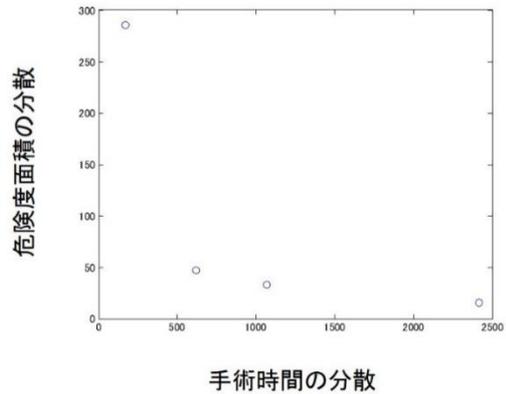


図7 パレート最適解の分布

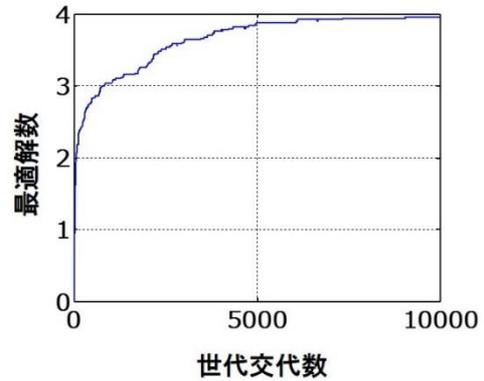


図8 手術割り当ての学習過程の平均特性

提案アルゴリズムによって割り振られた3つの手術を用いて, 1日の手術スケジュールを作成した結果について述べる. 補正值0.2としたときの割り振りパターン1(表2)について, 麻酔医Aの1日目の手術時間を決定したスケジュール案を図10,11に示す. 総時間660分の3件の手術時間を決定したスケジュール案について, 図10では, 190分間手術を並行させることで470分で業務を終了し, 危険度の平均値は1.028であった. また, 図11では, 300分間手術を並行させることで360分で業務を終了し, 危険度の平均値は1.399であった. 提案アルゴリズムにより, 複数の手術スケジュールを一度に作成し, 最終的に意思決定者が判断し運用スケジュールを決定できることを示した.

また, 大規模スケジューリングとして45件の手術を用意した場合について, 作成された手術スケジューリング結果を図12,13に示す. 1日あたりに担当した手術時間の和の平均値は麻酔医Cが744分, 麻酔医Dが726分, 麻酔医Eが726分であり, 1日あたりの危険度確率分布値の平均値は麻酔医Cが1.18, 麻酔医Dが1.02, 麻酔医Eが0.81と, 提案アルゴリズムによって熟練度に応じた手術の割り振りおよび時間決定が実現できており, 全探索法と比較して計算量を大きく削減できた.

表2 手術割り当てパターン

	A1			A2			B1			B2		
パターン1	2	7	11	4	8	9	1	6	12	3	5	10
パターン2	2	8	12	4	6	11	1	7	9	3	5	10
パターン3	2	7	11	6	8	9	1	4	12	3	5	10
パターン4	1	11	12	5	7	8	2	6	10	3	4	9

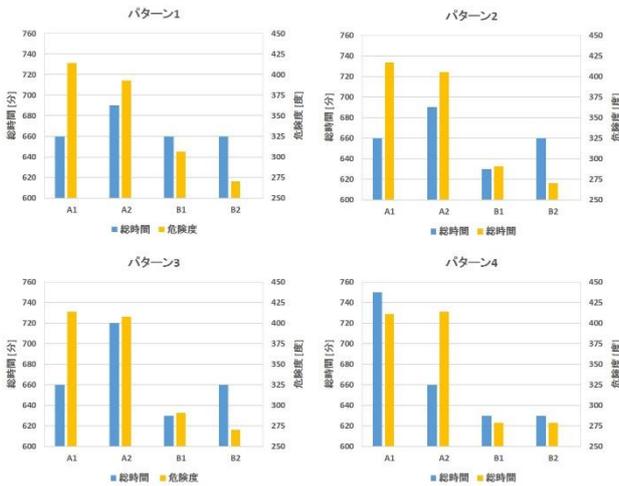


図9 手術割り当てパターンの評価

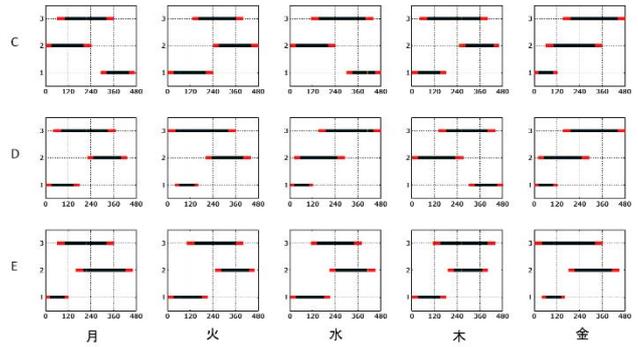


図12 5日間の手術スケジュール

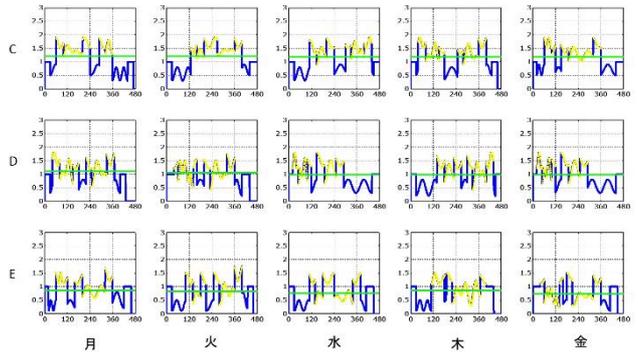


図13 5日間の手術スケジュールの危険度

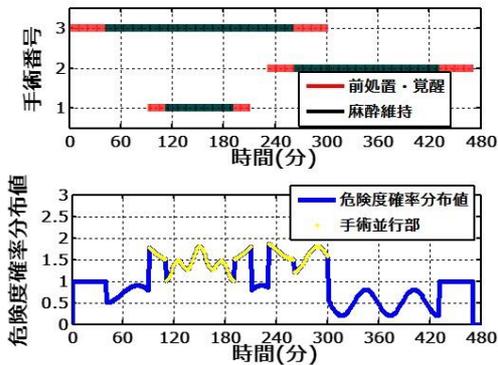


図10 医師Aのスケジュール案1

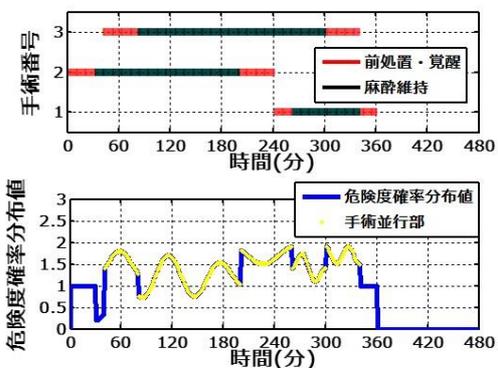


図11 医師Aのスケジュール案2

4. まとめ

麻酔医が担当する手術の時間的効率性とそのリスクを考慮し、非優越ソートGAによって適切に麻酔医に対して手術を割り振る手術スケジュールリングアルゴリズムを構築した。スケジュール作成者は、得られる複数のスケジュールの中から医療機関毎の要求に応じて任意に実用するスケジュールを選択できる。また、提案アルゴリズムは医師人数およびスケジュール日数の拡張が可能であり、手術にどの医師、どの日時に行うかの優先度を設定が可能であり、医師の休暇なども考慮できる汎用性のあるシステムとなっている。

参考文献

[1] 鈴木敦夫, 藤原祥裕, “手術室のスケジュールリング支援システムについて”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.58, No.9, pp.515-523 (2013)

[2] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.2, pp182-197 (2002)

[3] 吉井健吾, 廣安知之, 三木光範, “多目的遺伝アルゴリズムにおける近傍交叉の効果”, 情報処理学会論文誌.数理モデル化と応用, Vol.48, No.SIG 2(TOM 16), pp40-48 (2007)

[4] 稲田英一, “医療における麻酔科医の役割”, 順天堂医学, Vol.52, No.1, pp35-44 (2006)