

## 制約充足ソルバーを用いた手術スケジュール作成

東京工業大学  
01704970 東京工業大学  
エピグノシステムズ株式会社  
エピグノシステムズ株式会社  
エピグノシステムズ株式会社, 東北大学

\*黒田 航太郎 KURODA Kotaro  
山下 真 YAMASHITA Makoto  
乾 文良 INUI Fumiyoshi  
Malik Olivier Boussejra  
志賀 卓弥 SHIGA Takuya

### 1. はじめに

病院ではナーススケジューリングなどに見られるように様々なスケジュールの作成が必要である。本研究では、スケジュール作成の中でも特に手術室に関わるスケジュールを対象とする。

手術室が複数ある場合に、どの手術をどの手術室に割り当てるかを適切に割り当てると、一日の全ての手術が終了する時間を早くできるが、このことは外科医や看護師などの残業削減につながる。残業時間を最小にすることは重要であるが、この最小化は様々な制約のために必ずしも自明ではない。

一般的には混合整数計画問題 (mixed-integer linear programming) として定式化することが多く、例えば Pulido ら [1] は big-M などを用いて定式化を行っている。しかし、実際には手術に関する全ての制約を MILP の定式化で網羅することは困難であり、MILP の厳密解を正確に求解することは現実的ではない。

本研究では、制約充足ソルバーの一つである OptaPlanner [2] を用いてヒューリスティクス解法を適用することにより、優れた解を現実的な時間で得ることを考える。

### 2. 数理モデル

手術の対象となる集合を  $S$  とし、各手術を  $s \in S$  と表記する。手術に関する時間は、(1) 準備時間  $TP_s$ , (2) 手術時間  $TS_s$ , (3) 清掃時間  $TC_s$  の3つに分割できる。このうち (2) は外科医が直接担当しなければならないが、(1),(3) は外科医以外が担当することが可能であるため、(1),(3) の時間に外科医が他の手術  $s' \in S (s' \neq s)$  を担当できる。手術  $s$  に対して、(2) に相当する手術時間  $TS$  の開始時刻を  $ts_s$  とすると、手術室の使用開始時刻は  $ts_s - TP_s$  であり使用終了時刻は  $ts_s + TS_s + TC_s$  である。

本研究では、ある病院のデータを用いており、その病院では手術開始可能時間が午前9時であり、午後5時までに基本的には終了することとなっており、 $T = 480$  分を超過していれば残業に相当とする。したがって、手術  $s$  に関する超過時間  $E_s$  は、

$$E_s = \max\{ts_s + TS_s + TC_s - T, 0\}$$

で表現される。この超過時間の合計

$$\min \sum_{s \in S} E_s$$

を最小化することが目的関数となる。

制約としては、主に2つある。まず異なる手術  $s, s'$  が同じ手術室で行われる場合には時間が重複することが出来ない。このことは、

$$ts_s + TS_s + TC_s \leq ts_{s'} - TP_{s'}$$

で表現できる。また、同じ外科医が手術  $s, s'$  を立て続けに行う場合には休憩時間  $PT$  を挟む必要があり、このことは

$$ts_s + TS_s + PT \leq ts_{s'}$$

によって表現できる。

### 3. OptaPlanner による求解

本研究では、制約充足ソルバーである OptaPlanner を用いるが、以下のような利点がある。

- 様々なヒューリスティクス解法が実装されているため、異なるヒューリスティクス解法の比較が容易である。
- 制約式が満たされていない場合に、どの制約式をどの程度違反しているかを特定するのが容易である。

表 1: 実データによる計算

例	計画日数	手術件数	手術室	外科医の人数	手法	計算時間 (秒)	超過時間 (分)
1	6	106	13	40	二段階	351.637	380
					一段階	350	1200
2	6	111	13	39	二段階	370.832	515
					一段階	370	1655
3	6	110	13	39	二段階	351.571	1085
					一段階	350	2220
4	6	117	13	41	二段階	351.852	380
					一段階	350	1380

OptaPlanner では、初期解を生成した後に局所探索で改善を行っていくが、初期解の生成については First Fit, First Fit Decreasing, Weakest Fit などが準備されており、本研究では予備実験における性能比較を行い First Fit Decreasing を選択した。このことは、手術時間が長い手術を先に割り当てたほうが全体の割り当てを行いやすくなる、ということを示唆していると考えられる。

局所探索についても、Simulated Annealing や Tabu Search が OptaPlanner には用意されているが、こちらも予備実験から Simulated Annealing を選択した。

OptaPlanner では、複数の制約からの違反を最小化するように解の探索が行われる。特にそれぞれの制約は必ず満たすべきハード制約と可能な限り満たすべきソフト制約に分類する必要があり、「数理モデルをどのようにハード制約とソフト制約として表現するか」が最終的に出力される解の質に直結する重要なステップである。本研究では、ハード制約としては手術の重複や外科医の休息時間に関する制約の違反とした。具体的には、以下のような値が違反としてカウントされる。

$$\max\{ts_s + TS_s + TC_s - ts_{s'} + TP_{s'}, 0\}$$

$$\max\{ts_s + TS_s + PT - ts_{s'}, 0\}$$

一方でソフト制約の違反量は  $\sum_{s \in S} E_s$  とすることで超過時間の合計を最小化することを OptaPlanner の解探索に反映させた。

#### 4. 数値実験

本研究では、病院の実データに基づく 6 日間のスケジュール作成を計算対象として、6 日間分のスケジュールを設定した計算時間の半分程度で計算した後それぞれの日ごとで再計算する二段階

手法と、6 日間のスケジュール作成に設定した計算時間すべてを用いる一段階手法を比較をした。比較結果をまとめたのが表 1 である。この結果では同程度の計算時間で一段階手法に比べ、二段階手法の方が大幅に超過時間を減らせることがわかった。特に、例 1,2,4 では別途得ていた超過時間の下界値と二段階手法の超過時間が一致しており、最適値であることを確認している。例 3 も下界値は 1080 であり、本研究で得られた超過時間は最適値に十分近い。二段階手法が優れた超過時間を達成できたのは、6 つの一日分のスケジュールを作成する問題に分解したことで問題サイズを小さくすることが効果が高かったと考えられる。

#### 5. 今後の研究の方向性

本研究では手術に関する割り当てを制約充足ソルバーの OptaPlanner で行ったが、さらに実用性を高めるには麻酔科医や看護師のスケジュールなども同時に考慮に入れる必要がある。また使用機材などをどのようにやりくりするか、も重要な視点の一つと考えられる。

#### 参考文献

- [1] R. Pulido, A. M. Aguirre, M. Ortega-Mier, Á. García-Sánchez, and C. A. Méndez. Managing daily surgery schedules in a teaching hospital: a mixed-integer optimization approach. *BMC health services research*, 14(1):464, 2014.
- [2] Red Hat, Inc. OptaPlanner. <https://www.optaplanner.org/> (2019/06/15 閲覧).