

手術への麻酔科医・看護師の自動割当システムの試作

2016SS051 丹羽亮介 2017SS067 杉本涼

指導教員：鈴木敦夫

1 はじめに

現在、多くの病院では手術へのスタッフの割り当てが担当者により手動で行われている。手作業であるがゆえに手間や時間がかかること、勤務希望がそぐわないこと、公平性に欠けていることなどいくつもの弊害が生じている。これ以上スケジューリング業務に負担が加われば担当者には本来の業務に影響を及ぼしかねない。また、手術室の運用は病院経営において最重要である。なぜなら多くの病院において収入源の大半を手術運用が占めているからだ。そこで本研究ではオペレーションズ・リサーチの手法を応用し、手術への麻酔科医・看護師の自動割当システムの試作を行う。最終的には実際の医療現場に導入できるレベルにまで仕上げ実用化を目指す。加えて、スケジューリング業務の負担軽減により手術室運用の最適化、および病院経営の効率化を支援することが目標である。

現在、病院を始めとする医療機関ではその部局ごとにオペレーションズ・リサーチの手法であるスケジューリング問題を利用して解決することができる問題がいくつも存在する。それらの問題は病院全体のシステム機能を用いて解決するよりは、部局ごとに小規模システムを利用して解決することが適切な場合が多い [1]。実際、スケジューリング等の支援システムが病院全体のシステム機能として組み込まれている場合もあるが、多くの場合それらの機能は使われていない。なぜなら、それらのシステムは現場の要望を十分に反映できていないなどの理由からである。したがって、これらの手術スケジューリング問題は手作業で行われ、長時間の作業を強いている。また、患者や医師にとって手術が決まったら一刻も早く手術を行い病状悪化を防ぎたいのは言うまでもないが、病院経営においても手術室を効率的に運用することは重要な課題である。医療サービスにおいて、どの手術を、いつ、どの手術室で行い、そしてその手術を行うために必要なスタッフの割り当てを決定する手術室のスケジューリングは入院患者の病床スケジューリングと並ぶ重要な要素である。

日本全国には現在約 8,000 施設以上の病院があり、それらの病院でこのような問題を解決することができれば医療現場の効率化に大きく貢献することができる [2]。ここでは、われわれが取り組んでいる手術における麻酔科医・看護師のシフトスケジューリング問題をオペレーションズ・リサーチの手法を応用した自動スケジューリングシステムによって解決する方法について紹介する。現在は最終的な医療現場での導入を目指し、システムの使い勝手や解の品質、有用性について検証し改善を重ねている。

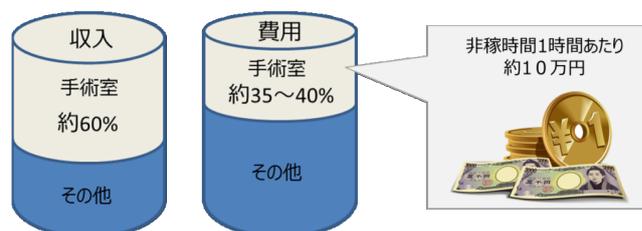


図 1 病院における手術に関する収入と費用 [4]

2 問題解決へのアプローチ

従来のスケジューリング問題に対しては、すべての制約を同時に満たすような定式化が行われることが多かった。ところが、このようなアプローチでは開発コストの増加や使い勝手、更に、スケジュール作成者の経験や相性が反映されないなどといった面で適切ではないと考えられる。多くのスケジューリング問題では現場の非常にきめ細やかな配慮があり、そのすべての定式化を行うのは非常に困難である。また、すべての制約を満たすような定式化をし、システム構築にいたっても複雑な制約を実現するために問題が複雑になり大規模になってしまう。そして、解を得るための計算時間もかかってしまう。

そこで本研究では、データから読み取れる部分に関してのみ自動割り当てを行う。このような問題解決のアプローチならば、システムの導入が容易になり、現場担当者の負担を大幅に軽減させることができると考える。

3 手術スケジューリングの手順

本節では、自動割当システムにおける手術スケジューリングの具体的な流れを示す。

- (1) 各手術室に手術症例を割り付け、手術データを作成する
- (2) 麻酔科医の月間勤務予定表にスキルマップを組み合わせることで、麻酔科医の割り当てデータを作成する。
- (3) 看護師の月間勤務予定表にスキルマップを組み合わせることで、看護師の割り当てデータを作成する
- (4) (1) で作成した手術データに対し、正確な手術時間情報を組み合わせる。
- (5) (2), (3) で作成した麻酔科医データ、看護師データを (4) で作成した手術データに割り当てる。

本研究では、手術スケジューリングの手順 (5) の最終段階を行う。システムの理想としては、最終段階一回の計算で解を求めるのではなく、得られた解や条件を何回か修正

しながら最終的な割り当てを決めるようなアプローチを目指している。こうすることで、現場の要望を反映することが容易になるだけでなく、担当者が利用する際の使い勝手が向上すると考える。

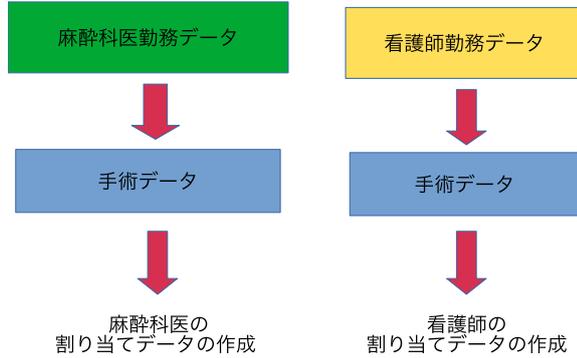


図2 手術スケジューリング作業の手順

4 問題の定式化

本節では、前述の自動割当問題について、麻酔科医・看護師を割り当てた場合の定式化を示す。定式化においては、あらかじめ割り当てを固定させるための定数、制約条件を設けている。計算により割り当てを求めるのではなく、あらかじめ割り当てが決まっているもの、あるいは修正を行う際に割り当てを固定させない箇所のために用いる。なお、定式化は0-1整数計画法の問題として定式化する。

添字

- i : 手術を表す添字 $i = 1, \dots, m$
- j : 麻酔科医を表す添字 $j = 1, \dots, n$
- k : 看護師を表す添字 $k = 1, \dots, l$
- p : シフトを表す添字 $p \in \{\text{午前} : 1, \text{午後} : 2, \text{全日} : 3\}$
- q : 麻酔科医のスキルレベルを表す添字 $q \in \{1, 2, 3, 4\}$
- I_1 : 午前に行われる手術の添字
- I_2 : 午後に行われる手術の添字
- I_3 : 全日で行われる手術の添字

4.1 麻酔科医の割り当て

4.1.1 記号の定義

定数

- A_p^q : シフト p で勤務しているスキルレベル q の麻酔科医の集合 $p \in \{1, 2, 3\}, q \in \{1, 2, 3, 4\}$
- a_i^q : 手術 i に必要な麻酔科医のスキル別人数 $i = 1, \dots, m, q \in \{1, 2, 3, 4\}$
- t_j : 麻酔科医 j のレベル $j = 1, \dots, n$
- r_i : 手術 i に必要な麻酔科医のレベル $i = 1, \dots, m$

- $s_{ii'} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } i, i' \text{ の実施時間が重なって同時にできない} \\ 0 \cdots \text{手術 } i, i' \text{ の実施時間が重なっても同時にできる} \end{cases}$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } i \text{ に麻酔科医 } j \text{ が割り当て可能} \\ 0 \cdots \text{割り当て不可能} \end{cases}$$

$$q_{ij} = \begin{cases} t_j \cdots r_i \leq t_j \text{ の時の麻酔科医のランク} \\ \epsilon \cdots r_i > t_j \text{ の時の麻酔科医のランク} \end{cases}$$

変数

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } i \text{ に麻酔科医 } j \text{ を割り当てる} \\ 0 \cdots \text{割り当てない} \end{cases}$$

ダミーの値

$$\alpha_i^q : \text{手術 } i \text{ に割り当てるスキルレベル } q \text{ のダミーの麻酔科医 } i = 1, \dots, m, q \in \{1, 2, 3, 4\}$$

4.1.2 定式化

目的関数

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^4 \alpha_i^q \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{j \in A_1^q \cup A_3^q} x_{ij} = a_i^q, \quad i \in I_1, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A_2^q \cup A_3^q} x_{ij} = a_i^q, \quad i \in I_2, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A_3^q} x_{ij} = a_i^q, \quad i \in I_3, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (4)$$

$$\sum_{i'=1, s_{ii'}=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i'j} \leq |A_1^q| + |A_3^q| + \alpha_i^q, \quad i \in I_1, q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (5)$$

$$\sum_{i'=1, s_{ii'}=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i'j} \leq |A_2^q| + |A_3^q| + \alpha_i^q, \quad i \in I_2, q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (6)$$

$$\sum_{i'=1, s_{ii'}=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i'j} \leq |A_3^q| + \alpha_i^q, \quad i \in I_3, q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq p_{ij}, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$r_i \leq \sum_{j=1}^n q_{ij} x_{ij}, \quad i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (10)$$

式の説明

- (1) ダミー麻酔科医の人数を最小化
- (2) スキル別麻酔科医の必要人数制約 (午前に行われる手術について)

- (3) スキル別麻酔科医の必要人数制約
(午後に行われる手術について)
- (4) スキル別麻酔科医の必要人数制約
(全日で行われる手術について)
- (5) 手術が同時に行われるとき、割り当てられる麻酔科医が手術に参加できる麻酔科医の合計をこえない制約
(午前に行われる手術について)
- (6) 手術が同時に行われるとき、割り当てられる麻酔科医が手術に参加できる麻酔科医の合計をこえない制約
(午後に行われる手術について)
- (7) 手術が同時に行われるとき、割り当てられる麻酔科医が手術に参加できる麻酔科医の合計をこえない制約
(全日で行われる手術について)
- (8)) 手術に割り当てられる麻酔科医は、割り当て可能範囲以下
- (9) 手術に必要なレベル以上のスキルを持つ麻酔科医を割り当て、それ以外の麻酔科医も割り当てる制約
- (10) バイナリ制約

4.2 看護師の割り当て

4.2.1 記号の定義

定数

- B_p^q : シフト p で勤務しているスキルレベル q の看護師の集合 $p \in \{1, 2, 3\}, q \in \{1, 2, 3, 4\}$
- b_i^q : 手術 i に必要な看護師のスキル別人数
 $i = 1, \dots, m \quad q \in \{1, 2, 3, 4\}$
- d_i : 手術 i を担当する執刀医 $i = 1, \dots, m$

$$s_{ii'} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } i, i' \text{ の実施時間が重なって同時にできない} \\ 0 \cdots \text{手術 } i, i' \text{ の実施時間が重なっても同時にできる} \end{cases}$$

$$e_{ik} = \begin{cases} 0 \cdots \text{手術 } i \text{ (執刀医) と看護師 } k \text{ の相性が良い} \\ 1 \cdots \text{相性がふつう} \\ 2 \cdots \text{相性が良くない} \end{cases}$$

*手術 i にはすでに担当する執刀医が決まっているものとする.

$$w_{ik} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } i \text{ に看護師 } k \text{ が割り当て可能} \\ 0 \cdots \text{割り当て不可能} \end{cases}$$

変数

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } i \text{ に看護師 } k \text{ を割り当てる} \\ 0 \cdots \text{割り当てない} \end{cases}$$

ダミーの値

- β_i^q : 手術 i に割り当てるスキルレベル q のダミーの看護師 $i = 1, \dots, m, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\}$

パラメーターの値

δ : 手術を担当する執刀医と看護師の相性の重み

4.2.2 定式化

目的関数

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^4 \beta_i^q + \delta \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l e_{ik} y_{ik} \quad (11)$$

制約条件

$$\sum_{k \in B_1^q \cup B_3^q} y_{ik} = b_i^q, \quad i \in I_1, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (12)$$

$$\sum_{k \in B_2^q \cup B_3^q} y_{ik} = b_i^q, \quad i \in I_2, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (13)$$

$$\sum_{k \in B_3^q} y_{ik} = b_i^q, \quad i \in I_3, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (14)$$

$$\sum_{i'=1, s_{ii'}=1}^m \sum_{k=1}^l y_{i'k} \leq |B_1^q| + |B_3^q| + \beta_i^q, \quad i \in I_1, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (15)$$

$$\sum_{i'=1, s_{ii'}=1}^m \sum_{k=1}^l y_{i'k} \leq |B_2^q| + |B_3^q| + \beta_i^q, \quad i \in I_2, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (16)$$

$$\sum_{i'=1, s_{ii'}=1}^m \sum_{k=1}^l y_{i'k} \leq |B_3^q| + \beta_i^q, \quad i \in I_3, \quad q \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (17)$$

$$y_{ik} \leq w_{ik}, \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, l \quad (18)$$

$$y_{ik} \leq 2 - e_{ik}, \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, l \quad (19)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m, \quad k = 1, \dots, l \quad (20)$$

式の説明

- (11) ダミーの看護師と、手術を担当する執刀医と看護師の相性の重み和を最小化
- (12) スキル別看護師の必要人数制約
(午前に行われる手術について)
- (13) スキル別看護師の必要人数制約
(午後に行われる手術について)
- (14) スキル別看護師の必要人数制約
(全日で行われる手術について)
- (15) 手術が同時に行われるとき、割り当てられる看護師が手術に参加できる看護師の合計をこえない制約
(午前に行われる手術について)
- (16) 手術が同時に行われるとき、割り当てられる看護師が手術に参加できる看護師の合計をこえない制約
(午後に行われる手術について)
- (17) 手術が同時に行われるとき、割り当てられる看護師が手術に参加できる看護師の合計をこえない制約
(全日で行われる手術について)

- (18) 手術に割り当てられる看護師は、割り当て可能範囲以下
- (19) 執刀医と看護師の相性が悪い組み合わせを除外する制約
- (20) バイナリ制約

5 自動割当システムの概要

この節では手術への麻酔科医、看護師の自動割り当てを実際の病院の中規模なサンプルデータをもとに計算を行った結果の一例を示す。計算環境は OS: Microsoft Windows10, CPU: Intel Core i5, RAM: 8GB. また、最適化ソフトウェアとして Python と MIPCL を使用し、CSV ファイル上に準備したサンプルデータをもとに実装を行った [3]。サンプルデータは、手術数:23 件、麻酔科医:14 名、看護師:28 名を用い、その他の集合や定数に関しては任意に設定した。

5.1 システムの実装結果

麻酔科医の割り当て

サンプルデータをもとに麻酔科医の割り当てを行った結果、自動割り当てにかかった計算時間は 62 秒だった。

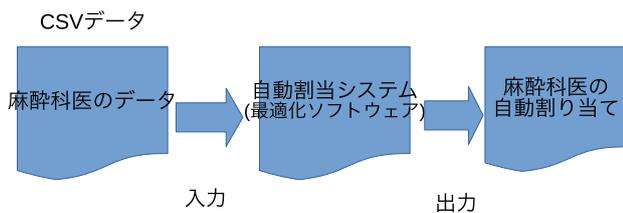


図 3 麻酔科医の割り当てシステムの実装プログラム

看護師の割り当て

サンプルデータをもとに看護師の割り当てを行った結果、自動割り当てにかかった計算時間は 96 秒だった。看護師に関する制約自体は麻酔科医に比べ多いため、計算時間は多少かかった。

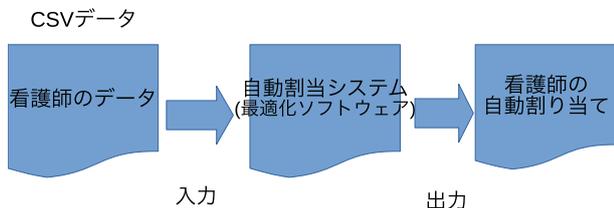


図 4 看護師の割り当てシステムの実装プログラム

5.2 システムの工夫点

システムの仕様に関してはまだ改善段階であるが、中規模病院での実際のデータを用いてリアルな医療現場での実用を想定したモデルの構築と実装を行った。例えば、同じ手術を同時帯に行う状況を想定するとその現場には同じ

スキルを持ったスタッフが必要となる。そこであらかじめダミーの麻酔科医、看護師を設けることで、万が一必要スタッフが不足した際にシステムが実行不可能になることを防ぐ工夫を行った。

手術現場においてスタッフの相性も考慮すべき点のひとつである。特に長時間行われる手術において、器具の出し手である看護師と受け手である執刀医との相性は手術の行方を左右するといえる。そこで、執刀医と看護師の相性を示す値を設定し目的関数と制約条件に組み込むことで、できる限り相性の良い組み合わせで割り当てられるようにシステム設計上の配慮を行った。

6 おわりに

現段階のシステムは、中規模病院での実際のデータを模したものである。そのため、手術の数、スタッフの人数、スキルマップ、など基本的な制約を反映したシステム設計となっているため解の有用性についてはある程度担保できると言えるだろう。しかし、実際にはこのように明確な値だけでなく、データには現れない部分も多く存在する。例えばスタッフの相性については、事前に目的関数と制約条件に組み込んだもののデータとしての判断は非常に難しく、担当者や本人など現場での独自の判断が求められるに違いない。このような側面を考慮すると現段階でのシステム仕様では医療現場のニーズに完全に一致できていないと言いがたい。その反面、すべての条件面を考慮して値や制約条件を追加すればするほど解の出力が困難になり、同時にシステム自体の規模も肥大化してしまう問題もある。いずれにせよ、制約条件を完全に満たす自動システムの作成は困難ではあるが、今後も担当者との入念な協議を行い、より満足度の高いシステムになるよう更に改善を行う予定である。

参考文献

- [1] 藤原祥裕, 鈴木敦夫: 手術のスケジューリング支援システムについて. 公益社団法人日本オペレーションズ・リサーチ学会, 経営の科学, Vo. 58, No. 9, pp.515-523, 2013.
- [2] 大西愛乃: 医療機関におけるスケジューリング支援システムの試作. 南山大学大学院 理工学研究科 2015年度 修士論文, (2016)
- [3] Atsuo Suzuki, Ryosuke Niwa and Ryo Sugimoto, Optimal Assignment of Operating Room Staffs and Medical Facilities to the Operations - A case study in Aichi Medical University Hospital, Proceedings of the Scheduling Symposium 2020, pp.161-164 (2020)
- [4] denON ENGINEERING : Sullivan Health Care Consultant, 700 箇所以上の手術室を調査したデータベース. <https://ortis.denon-eng.jp/management/biz>. 2021年1月8日閲覧.