

手術時間の不確実性と遅延リスクを考慮した手術室のスケジューリング

05001373 東京理科大学 *難波 禎人 NAMBA Yoshito
 05000319 東京理科大学 伊藤 真理 ITO Mari
 01308970 東京理科大学 高嶋 隆太 TAKASHIMA Ryuta
 国立がん研究センター東病院 橋本学 HASHIMOTO Manabu
 国立がん研究センター 藤井博史 FUJII Hirofumi

1. はじめに

手術管理の効率化は、患者の治療の質と病院経営において重要な課題である。患者の治療の質に関して、手術の予定終了時刻からの遅延による患者の長い待ち時間が問題視されている。また、病院経営に関して、手術は病院の収入及び支出の大きな割合を占めている[3, 4]。したがって、手術室の稼働率の向上や手術にかかる費用削減を目標に手術室のスケジュールを作成している。

手術室のスケジューリングの流れは、執刀医と患者が合意の上で手術の日程を決定し、執刀医は予定手術時間等を管理者に申告したのち、管理者はそれらの情報をもとに、いつどの手術室で手術を行うかを決定する。しかし、手術時間には不確実性があり、申告時間をもとにスケジュールを組んだ場合、予定終了時刻通りに手術室運営が行われない場合が多い。そこで、手術管理を効率的に行うためには、手術時間の不確実性を考慮した頑健なスケジューリングが求められる。

手術室のスケジューリングは国外を中心に幅広く研究されている。例えば、Denton et al. [1]では手術室の残業コストと開室コストを最小化する2段階確率計画モデルを提案した。しかし、手術順序について考慮されていない。実際にスケジュールされる際は、同一の診療科の手術は、同じ手術室で、連続で行われたほうが効率的になる。また、手術室のスケジューリングでは、手術室の管理者の手術の所要時間に対する遅延リスクを回避するという意思決定を考慮する必要がある。Ito et al.[2]は、この意思決定を反映するために、Conditional Value at Risk(CVaR)というリスク尺度を用いた単一手術室での手術時間の不確実性を考慮した手術室のスケジューリング問題を定式化した。

本研究では、複数の手術室を対象とした、リスク尺度の CVaR と遅延時間の期待値を最小化する確率計画モデルを定式化する。その際、手術の手術室への割り当てと、手術順序を考慮する。

2. モデル

手術室のスケジューリングモデルの文字の定義と定式化を以下に示す。ここでは紙面の都合上、一部の制約の記載を省略する。

文字の定義

集合

J : 手術の集合

S : 手術シナリオの集合

D : 診療科の集合

E_d : 同じ診療科の集合, ($d \in D$)

M : 手術室の集合

定数

d_j : 手術 j の終了時刻, ($j \in J$)

π_s : シナリオ s の発生確率, ($s \in S$)

p_{sj} : シナリオ s 下での手術 j の手術時間, ($s \in S, j \in J$)

α : CVaR のリスク反映度

β : 期待値と CVaR の重み

Δ : 任意の大きな値

n : 同診療科の手術数

変数

t_{js} : シナリオ s 下での手術 j の遅延時間, ($s \in S, j \in J$)

η : 閾値

μ_s : シナリオ s 下での η をこえる遅延時間 t_{js} の総手術時間, ($s \in S$)

z_{jk} : 手術処理に関するバイナリ変数, 手術 j が手術 k に先行する場合 $z_{jk} = 1$, そうでない場合 $z_{jk} = 0$, ($j, k \in J$)

x_{mj} : 手術室と手術に関するバイナリ変数, 手術室 m に手術 j が割り当てられれば, $x_{mj} = 1$, そうでない場合 $x_{mj} = 0$, ($m \in M, j \in J$)

γ_{mjk} : 手術室と手術の前後関係のバイナリ変数,

$\gamma_{mjk} = x_{mj}z_{jk}$, ($m \in M, j, k \in J$)

θ_m : 同診療科の手術 l, k と手術室 m に関するバイナリ変数, $\theta_m = x_{ml}x_{mk}$, ($l, k \in E_d$)

定式化

$$\text{Minimize } (1 - \beta) \mathbb{E}_s \left[\sum_{j \in J} t_{js} \right] + \beta \left(\eta + \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{s \in S} \pi_s \mu_s \right) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \eta + \mu_s \geq \sum_{j \in J} t_{js}, \forall s \in S, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in J \setminus \{j\}} p_{sk} \gamma_{mkj} + p_{sj} x_{mj} \leq d_j + t_{js} \quad (3)$$

$$+(\Delta - d_j)(1 - x_{mj}), \forall m \in M, \forall j \in J, \forall s \in S, \quad (4)$$

$$\sum_{j \in E_d} \sum_{k \in E_d} z_{jk} = \frac{1}{2} n^2 + \frac{1}{2} n, \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} \theta_m \geq 1. \quad (5)$$

上記の定式化について、目的関数(1)は遅延時間の期待値と CVaR の加重平均を最小化するものである。制約式(2)は各手術の遅延時間の合計が閾値と閾値を超えた際の超過時間として決定する。制約式(3)は手術室 m における手術時間と期限に基づいて遅延時間を決定する制約である。制約式(4)および(5)は同じ診療科の手術は連続して行う制約である。この他には決定変数に関する非負制約やバイナリ制約、非線形制約を緩和する制約、部分巡回回路制約、手術室と手術間の使用に関する制約、手術室の対称性をなくす制約等 10 個の制約式が存在する。

3. 数値実験

Gurobi 9.5.1 を使用して数値実験を行った。具体的には、手術が 11 件、手術室が 5 室と 10 室の場合それぞれで、遅延時間の期待値と CVaR の重みである β を 0–1.0 まで 0.1 ずつ変化させてスケジュールを作成する。確率計画モデルで使用するシナリオの発生確率は一様分布に従い、各シナリオの手術時間は対数正規分布に従うものと仮定し、ランダムに 100 個生成した。対数正規分布のパラメータである期待値と分散は、国立がん研究センター東病院の 9,567 件のデータに基づき算出した。

その結果、手術室が 5 室の場合のほうが 10 室の場合よりも、 β を変化させたときに、手術室の割り当て、また手術順序に変化があった。これは、少ない手術室へ効率的に手術を割り当てる必要があり、遅延リスクの考慮度合いに影響を受けやすいためである。また、図 1 より $\beta = 0$ とき、総遅延時間の期待値は小さくなり、 $\beta = 1$ とき、期待値が大きくなる代わりに、CVaR が小さくなり、遅延リスクが小さくなった。こ

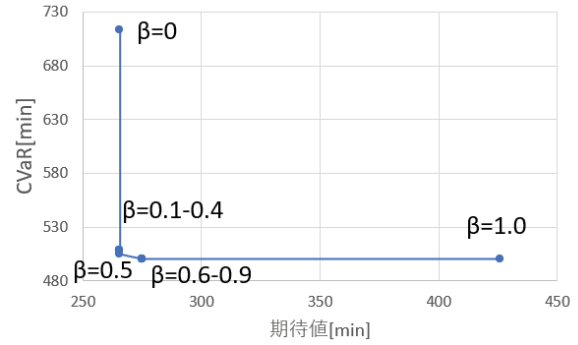


図 1. 遅延リスクと期待値の関係

のことから、総遅延時間の期待値と CVaR はトレードオフの関係があることがわかる。また、このようにリスク尺度を考慮することで手術順序が変化することは、手術室のスケジュールを実用化する際に、手術順序を考慮することの重要性を示唆している。

4. おわりに

本研究では、複数の手術室を対象とした、遅延リスク尺度の CVaR と遅延時間の期待値を最小化する確率計画モデルを定式化した。数値実験の結果から、遅延時間の期待値と CVaR にはトレードオフの関係があることがわかり、手術順序を考慮する重要性を確認することができた。今後の課題として、考慮するシナリオ数を増やすことや、限られた情報の中で、頑健なスケジュールを作成するために、ロバスト最適化を適応することなどが挙げられる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業若手研究（課題番号：21K14371）を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] Denton, B.T., Miller, A.J., Balasubramanian, H.J. & Huschka, T. R.: “Optimal Allocation of Surgery Blocks to Operating Rooms Under Uncertainty” *Operations Research*, vol. 58, no. 4, pp. 802–816, 2010.
- [2] Ito, M., Kobayashi, F., & Takashima, R.: “Risk Averse Scheduling for a Single Operating Room with Uncertain Durations” *Transactions on Engineering Technologies*, pp. 291–306, 2019.
- [3] Jackson, R.: “The Bushiness of Surgery,” *Health Management Technology*, vol. 23, no. 7, pp. 20–22, 2002.
- [4] Macario, A., Vitez, T. S., Dunn, B., & McDonald, T.: “Where are the Costs in Perioperative Care?: Analysis of Hospital Costs and Charges for Inpatient Surgical Care,” *Anesthesiology*, vol. 83, no. 6, pp. 1138–1144, 1995.