

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13952

研究課題名（和文）手術の終了時刻の不確実性を考慮した手術室のスケジューリング手法の開発

研究課題名（英文）Operating room scheduling under the uncertainty of surgical duration

研究代表者

伊藤 真理（ITO, Mari）

神戸大学・数理・データサイエンスセンター・特命准教授

研究者番号：20778211

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、どの手術室でいつ手術を開始するかを決定する手術室のスケジューリング問題を解いた。具体的には、手術時間の不確実性を考慮した確率計画モデルを提案した。本モデルでは予定の手術時間から大幅に遅れるリスクを条件付きバリュー・アット・リスク(CVaR)を用いて表現した。実データを用いた数値実験より提案モデルの有効性を評価した。結果より、CVaRと遅延時間の期待値を考慮することで全手術の遅延時間を削減しつつ、遅延リスクを避けるスケジュールが実現可能であることがわかった。手術室の管理方法として、遅延リスクを避けるためには手術時間の標準偏差が小さい手術順に行うなどの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

病院の収支の半数を占める手術室の管理は安定的な経営を維持するために重要である。本研究で提案した手術室のスケジューリングモデルは手術室の管理向上に貢献できる。また数値分析から得られた知見は、スケジュール作成時に容易に考慮することが可能であり、実用的である。本モデルの見解は手術室のスケジューリングに限らず、不確実性を伴うスケジューリング問題においての基となる。

研究成果の概要（英文）：The study proposed a stochastic programming model for scheduling operating rooms using the conditional value-at-risk (CVaR) as a criterion. The CVaR expresses the risk-aversion of the manager towards the risk that the surgical duration estimated by the surgeon could be significantly delayed. We evaluated the effectiveness of the proposed model based on numerical experiments in which we compared the schedules by the CVaR and the expected value of delay in the objective function to the schedules by the expected value without CVaR in the objective function. Since there is a trade-off between the CVaR and expected value, the manager's policy has a major impact on operating room operation. To avoid the risk of delayed surgery, the manager orders surgeries from small to big variances of duration.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：スケジューリング 確率計画

1. 研究開始当初の背景

手術は医療機関の総収入の約3分の2を占める収入源である(Jackson, 2002). その一方で、手術室の運営費用、医師や看護師などの人件費は、医療機関全体の支出の40%を占める(Macario and Vitez, 1995). 特に、残業における人件費は医療機関にとって、削減したい費用である. これらの背景を受けて、手術室の運営の効率化を担うために、手術室のスケジュールが作成されている. しかしながら、手術の終了時刻の不確実性の影響を受けて、スケジュールどおりに手術室の運営が行われていない. そのため、医療現場では場当たりに手術を他の手術室へ変更することや、手術の終了時刻の予測がつかないために他の手術室へ変更せず、予定している手術室を待ち続けることが少なくない.

医療機関の手術室のスケジューリング問題に関する研究は、国外を中心に数多く行われてきた. 近年、手術の終了時刻の不確実性への対処が課題となっている. 不確実性に対処する方法の一つに、不確実要因が従う確率分布を考慮した確率計画がある. 手術室のスケジューリングにおける確率計画問題では、一般的に遅延時間の期待値を最小化するような定式化が行われる. しかしながら、この方法では、予定していた手術の終了時刻からの遅延が非常に大きい手術に直面しうるリスクへ適切に対処できていない. つまり、期待値の最小化はスケジュール作成者が普段とっているリスク回避的な態度(たとえば、延びそうな手術後には他の手術のスケジュールをしないこと)を表現することができていない.

リスク尺度の一つにバリュー・アット・リスク(VaR)がある. VaRは、離散確率分布をある一定割合(α)と $1-\alpha$ に分割する値である分位点の概念を用いて定義される. しかしながら、VaRは凸の性質を持たないため、数理計画問題では取り扱いにくい. その欠点を改善したCVaRが数理計画問題に組み込むのに便利である.

近年、より精緻な手術室のスケジュールを作成し、手術室を効率よく運営することが重要視されている. 特に、確率的な手術室のスケジューリングは、頻繁に遭遇する不確定要素を捕捉しているため、現実的な状況を反映している. 上記で述べたとおり、国外では確率的な手術室のスケジューリング手法の研究が進んでいる. しかしながら国内外では医療制度が大幅に異なり、国外の事例を国内にそのまま適用することは難しい. 国内では確率的な手術室のスケジューリング手法の研究はほぼない.

2. 研究の目的

本研究では、手術の終了時刻の不確実性のリスク尺度にCVaRを用いる新しい手術室のスケジューリング手法を提案し、実社会へ貢献することを目的とする. 最適化計算より得られたCVaRの累積確率分布は、スケジュール作成者の手術室の変更のタイミングなどの意思決定を補助する役目を担うことができる.

3. 研究の方法

本研究は以下の手順で遂行し、「どのような手術室のスケジュールを作成したら、手術の遅延リスクを削減し、最適な管理を実現することができるのか。」を明らかにする.

(1) 問題のモデル化: CVaRのリスク尺度を用いた確率計画問題としての定式化

本項目における問題は、手術の終了時刻の不確実性を考慮し、どの手術室でいつ手術を開始するかを決定することである. 具体的には、手術の所要時間を確率変数とし、離散確率分布に従うとしたとき、予定の手術の終了時刻からの遅延が大幅に長い場合のある一定割合の平均遅延(CVaR)を最小化した. 手術室のスケジューリングに関する定式化は、Ito et al. 2016で提案したモデルを一般化した.

(2) 確率計画問題の解法

想定されるシナリオ数が増えるにつれ、変数と制約式の数も増大するので、大規模な数理計画問題となりうる. ただ、コンピューターの処理能力や汎用ソルバーの性能向上により、大規模な数理計画問題であっても高速かつ効率的に解ける場合が多い. 本研究で扱った手術室のスケジューリング問題は汎用ソルバーを用いて求解した.

(3) 提案モデルの有効性の検証と結果の解釈

(1)の提案モデルの有効性について実データを用いた計算実験によって検証した. さらに実際の手術室の運営に役立つ情報や知見を抽出した. 具体的には、遅延時間の期待値のみを最小化した場合と比較し、リスク尺度をモデルに組み込むことによって得られた知見を明確化した.

4. 研究成果

(1) 問題のモデル化: CVaR のリスク尺度を用いた確率計画問題としての定式化

従来の遅延時間の期待値のみの目的関数にリスク尺度として CVaR を組み込んだ。目的関数を以下に記す。

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

第 1 項目は遅延時間の期待値を表す。遅延時間の期待値は手術シナリオ s (手術 i の所要時間の組み合わせセット) 下での遅延時間 t_{is} と手術 i の重要度 w_i によって記す。第 2 項目は遅延リスク (CVaR) を表す。遅延リスクは閾値 η (VaR), 分位点 α , シナリオ s の生起確率 π_s と平均遅延 μ_s によって記す。 β は目的関数の各項の重み係数を表す。 β を変化させることによって遅延リスクの回避度を考慮する。制約式は CVaR の定義式や手術室の管理に関わる式など全 14 式ある。

(2) 確率計画問題の解法

本研究で扱った手術室のスケジューリング問題を汎用ソルバーで求解したところ、数秒で最適解を得た。さらに、今後の大規模な数理計画問題に対処するために、ヒューリスティック解法を提案した。

(3) 提案モデルの有効性の検証と結果の解釈

手術の所要時間は不確実なので、1 回のスケジュールにどのような手術の所要時間の組み合わせが存在するかは未知である。そのため、複数の手術の所要時間の組み合わせ (シナリオ) を生成した。手術の所要時間の分布は実データと先行研究より対数正規分布を仮定した。シナリオの生起確率は実データより一様分布を仮定した。

目的関数の CVaR と遅延時間の期待値の重み係数 β を 0 から 1 まで 0.1 刻みで変化させ、最適解に対する影響を分析した。図 1 に、 $\beta = 0$, $\beta = 0.5$, $\beta = 1$ のときの得られた解における遅延時間の累積分布関数を示す。 $\beta = 0$ のとき、遅延リスクを考慮せずに、遅延時間の期待値のみを最小化する。 $\beta = 0.5$ のとき、遅延リスクと遅延時間の期待値を同等に最小化する。 $\beta = 1$ のとき、遅延リスクのみを最小化する。遅延リスクを考慮した $\beta = 0.5$ と $\beta = 1$ のとき、遅延時間が 3,000 分で確率 1 に達する。一方で、遅延時間の期待値のみ考慮した $\beta = 0$ のとき、この値を超える。以上より、CVaR のリスク回避的な性質からわかるように、遅延リスクを考慮することによって、遅延時間のばらつきを抑える効果がある。まとめると、CVaR と遅延時間の期待値を考慮することで全手術の遅延時間を削減しつつ、遅延リスクを避けるスケジュールが実現可能であることがわかった。

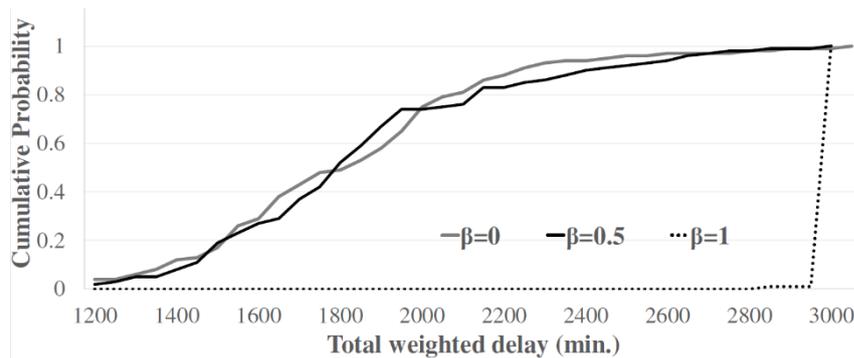


図 1: $\beta = 0$, $\beta = 0.5$, $\beta = 1$ のときの手術の遅延時間の累積分布関数

得られたスケジュールを確認すると、遅延リスクの考慮の有無によって、手術室への手術の割り当てられ方と手術順序が変化した。具体的には、遅延リスクを考慮したとき、標準偏差が大きい手術は独立して手術室に割り当てられた。複数の手術が同手術室に割り当てられた際には、標準偏差が小さい手術から順にスケジュールされた。遅延リスクを避けるためには、上記の割り当て方で手術室を管理することが望ましい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mari Ito, Yoichi Nakamura, Ryuta Takashima	4. 巻 -
2. 論文標題 Home Care Scheduling with Different Objectives for Local Government and Home Care Agency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2020 IIAI 5th International Conference on Enterprise Architecture and Information Systems	6. 最初と最後の頁 669-674
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 伊藤真理, 高嶋隆太	4. 巻 65(9)
2. 論文標題 地域包括ケアシステム実現に向けた数理的なアプローチ 千葉県野田市・流山市との地域連携	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 477-483
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mari Ito, Shizuka Hara, Mirai Tanaka, Ryuta Takashima	4. 巻 22
2. 論文標題 Examination-order Scheduling for Minimizing Waiting Time: A Case Study of a Medical Checkup	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Operations Research for Health Care	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.orhc.2019.100190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mari Ito, Fumiya Kobayashi, Ryuta Takashima	4. 巻 -
2. 論文標題 Risk Averse Scheduling for a Single Operating Room with Uncertain Durations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions on Engineering Technologies	6. 最初と最後の頁 291-306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-981-32-9808-8_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 伊藤真理
2. 発表標題 医療資源の効率的な活用 - ヘルスケア・スケジューリング -
3. 学会等名 第33回RAMP数理最適化シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木敦夫, 伊藤真理, 村端章吾
2. 発表標題 自動手術スケジュール機能について
3. 学会等名 フィリップス ユーザーカンファレンス 2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木敦夫, 伊藤真理
2. 発表標題 オペレーションズ・リサーチによる手術スケジューリングの自動化
3. 学会等名 日本臨床麻酔学会第41回大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Juan Ohara, Mari Ito, Ryuta Takashima, Takamori Ukai, Masaki Koizumi, Akemi Yano, Shunsuke Matsushima, Sadaki Inokuchi
2. 発表標題 Scheduling of Inpatient Hospital Beds: A Case Study of Ebina General Hospital
3. 学会等名 INFORMS Healthcare 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星野欣樹, 秋山諒太, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 手術スケジュールリングのための2段階アプローチ 手術数と手術室割り当ての最適化
3. 学会等名 スケジュールリング・シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 星野欣樹, 秋山諒太, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 手術室のスケジュールリング問題 - 緊急手術の不確実性とその影響 -
3. 学会等名 日本経営工学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小原樹杏, 伊藤真理, 高嶋隆太, 鵜飼孝盛, 小泉正樹, 矢野明美, 松島俊輔, 猪口貞樹
2. 発表標題 入院患者の病床スケジュールリング - 海老名総合病院の事例 -
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mari Ito, Kinju Hoshino, Ryuta Takashima, Manabu Hashimoto, Hiroyuki Yamamoto, Hirofumi Fujii
2. 発表標題 Operating Rooms Scheduling with Uncertain Durations of Surgeries
3. 学会等名 INFORMS healthcare 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kinju Hoshino, Mari Ito, Ryuta Takashima, Manabu Hashimoto, Hiroyuki Yamamoto, Hirofumi Fujii
2. 発表標題 Operating Room Scheduling: Analyzing the Trade-off between the Expectation and CVaR of Delay Time
3. 学会等名 The 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山諒太, 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太, 橋本学, 山本弘之, 藤井博史
2. 発表標題 緊急手術の発生を考慮した待機的手術の計画
3. 学会等名 スケジューリング・シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山諒太, 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 緊急手術発生リスクと待機的手術計画
3. 学会等名 都市のORウインターセミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山諒太, 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 緊急手術の不確実性を考慮した待機的手術計画
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤真理
2. 発表標題 医療福祉とエネルギー分野における数理最適化と政策影響分析
3. 学会等名 SSOR中部支部2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤真理
2. 発表標題 スケジューリング問題のモデリング: 実社会へ最適化手法を応用するために
3. 学会等名 第11回 名古屋組合せ論拡大セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤真理
2. 発表標題 医療福祉とエネルギー分野におけるスケジューリング問題
3. 学会等名 本部SSOR2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 手術室スケジューリングにおけるリスク回避度と手術順序の関係
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 単一手術室のスケジューリング問題における遅延リスク尺度の影響
3. 学会等名 日本経営工学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太
2. 発表標題 手術の所要時間の不確実性を考慮した手術室のスケジューリング
3. 学会等名 「都市のOR」ワークショップ2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野欣樹, 伊藤真理, 高嶋隆太, 山本弘之, 橋本学, 藤井博史
2. 発表標題 遅延時間の不確実性を考慮した複数手術室のスケジューリング
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------