

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330354

研究課題名(和文) 病院および地域における医療サービスシステムの工学的モデル化と検証

研究課題名(英文) Engineering model and verification for regional medical service systems including hospitals

研究代表者

高木 英明 (Takagi, Hideaki)

筑波大学・システム情報系(名誉教授)・名誉教授

研究者番号：30260467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：筑波大学附属病院における2年間にわたる産科入院患者について、入院から退院までの病棟間移動に関するログデータを分析し、待ち行列ネットワークの確率過程としてモデル化して、各病棟の毎日の在院患者数の度数分布が予測できることを実証した。また、横浜南共済病院における手術スケジューリングの効率化のために、医師による手術申込で記載された電子カルテの術式名や手術部位等をまとめて、毎週の手術予定表に記入する簡易術式名称に半自動的に変換するシステムを試作した。さらに、関連する待ち行列モデルとして、複数のサーバが待合せ放棄のある客を優先順位に基づいて処理する確率過程を解析した。

研究成果の概要(英文)：We have constructed a queueing network model for the patient flow over several wards in the obstetric unit of the University of Tsukuba Hospital, and succeeded in predicting the probabilistic distribution for the number of patients staying in each ward from the statistics of their admission rate and length of stay. Also, for Yokohama Minami-Kyosai Hospital, we have proposed and tested a semi-automatic method for converting doctor's order of surgical operation with patient's information into a succinct phrase to be displayed in a weekly scheduling table of the operating rooms. In addition, we have studied relevant queueing theory for analyzing multi-server, priority queues of impatient customers.

研究分野：サービス科学

キーワード：医療・福祉 サービス工学 数理工学 データサイエンス 待ち行列

1. 研究開始当初の背景

高齢化が進む我が国においては、国民の健康・医療・介護を支えるシステムを地域ネットワークとして効率的・効果的に運用する体制の整備が喫緊の課題である。我が国では、医学・医療の基礎及び臨床研究が高度化する一方において、医療機関におけるサービスを担当する医師・看護師等の業務管理や外来及び入院患者の院内外におけるサービスの受け手としての取扱いに関するオペレーション管理の研究は少ない。また、手術は急性期病院の経営に関わる基幹業務であるが、手術のスケジュール作成に対する科学的・工学的アプローチの実用化も進んでおらず、多くの調整や事務作業に医師・看護師・事務職員が膨大な時間を費やしているのが現状である。

2. 研究の目的

上記の現状に鑑み、本研究では、総合病院の協力を得て、医学的研究ではなく、病院を患者に対する医療サービスシステムとして捉え、「患者の取扱い」に焦点を当てて、数理工学とデータサイエンスの手法により、データ分析、数理工学的モデル化、及び最適システム設計を研究する。具体的には、入院患者の病棟内移動のモデル化・可視化、手術実施に係る一連のプロセスの時間的・空間的把握と最適設計、救急車たらい回しの回避法等に取り組む。更に、一般に顧客・従業員・設備が関わるサービスシステムにおいて、人が待ち時間について感じる満足度をシステムの性能として評価する数理モデルを探究する。

3. 研究の方法

本研究では、総合病院における課題を医療情報部や電算部から提供される実績データを分析することにより発見する。協力を得た病院は、筑波大学附属病院(2011~2014年度科研費研究期間)と国家公務員共済組合連合会横浜南共済病院(神奈川県横浜市)である。本研究は、患者個人に対する侵襲・介入を伴わない観察研究であるが、患者を特定した情報を扱うことについて、筑波大学システム情報系研究倫理委員会、及び横浜南共済病院臨床研究審査委員会に審査を申請し、それぞれ2017年3月21日及び4月26日付けで承認を受けた。

与えられた実績データを統計的に分析することにより、患者の取扱いを数量的に把握することができ、浮かび上がった問題点を、病院の業務担当者と検討して、研究課題を設定する。課題は数理工学的モデルとして定式化し、オペレーションズ・リサーチ分野の待ち行列理論や離散最適化理論を応用して考察する。結果は、現場の言葉を用いて数値的に示し、実用化を目指す。逆に、これらの現実的課題に対応するために、理論モデルを開拓・発展させることも研究に含める。ともに、研究成果は、国内外の学会・専門雑誌において発表する。

4. 研究成果

2014~2017年度における研究成果を3分野に分けて述べる。

(1) 病院の入院患者の病棟間移動に対する待ち行列ネットワークモデル

筑波大学附属病院医療情報部から2010年4月1日~2012年3月31日までの731日間における全ての入院患者について(患者名は暗号化)入院から退院までの病棟間移動の月日記録の提供を受けた。そのうちの産科患者1,956名について、まず、有限期間に対するLittleの定理を用いて病棟間移動実績を検証し、データの精度を確認した。

次に、産科患者が主に収容される26床をもつ300病棟(正常分娩患者用)と6床をもつ30M病棟(異常分娩患者用)の間の患者の移動を、主要な5経路で特定し、それらの経路を取る1,894名の患者のデータ(入退院日、病棟間の移動日)と各病棟の毎日(深夜0時に計測)の在院患者数のヒストグラムの実績をできるだけ説明できる待ち行列ネットワークモデルを考案した。

具体的には、各病棟での到着過程と退出過程がPoisson過程で近似できることを1日当たりの到着・退出数がPoisson分布に従うことと、当日と翌日で相関がないことで確認した(研究対象として産科患者を選んだ理由は、出産は比較的自然に発生するのでPoisson過程で近似しやすいと思われたからである)。30M病棟は、滞在時間を指数分布で近似できることが実証されたので、M/M/6待ち行列のサービス施設部分でモデル化した。一方、300病棟は、満室になる日が少ないことと、滞在時間が指数分布に従うとは言えないことから、M/G/の系内容数とM/M/6の待合室にいる客数の畳み込みでモデル化した。実際、300病棟は30M病棟への入室を待つ異常分娩患者が使うことを病院の医師に確認した。

待ち行列ネットワークモデルのパラメータを実績データから決定し、それらを用いた両病棟の在院患者数の確率分布を理論式の数値計算で求めた。その結果、毎日の平均入院数と患者の各病棟在院日数が与えられると、各病棟に毎晩在院する患者数の確率分布が計算でき、それが実際に観測されたデータとよく一致することが確認できた。

本研究において提案・実証された待ち行列ネットワークモデルは現実の患者の流れの極めて粗い近似であるが、観察された各病棟の在院患者数の確率分布とかなり一致する結果が得られるので、病院において、診療科への病床数割当てを変更する際の病床稼働率の予測等に使えると思われる。

この研究成果を、アメリカのIT関連企業が集うサービスサイエンスの学会SRII Global Conference 2014で発表し(下記の学会発表

) Best Paper Award in IT Innovation for Health Care Serviceを受賞した。また、米国の有名病院 Mayo Clinicが主催した研究集会 Delivery Science Summit 2015でも発表した

(学会発表)。更に、医療サービス分野の審査付き論文誌 Health Care Management Science に発表した論文(雑誌論文)は、後に第6回(2017年度)日本OR学会待ち行列研究部会論文賞を受賞した。

この研究に続けて、同病院の小児科患者の病棟間移動のデータを整理し、解析が可能な状況を作り、主要経路を特定した。主に2つの病棟間を移動する産科患者に比べて、小児科患者は3つの病棟(ICUを含む)間で移動するので、より複雑なネットワークモデルが必要である。実データの統計的分析から、新生児患者の病棟内移動について、3つの病棟間を移動する患者の流れを、待ち行列ネットワークと、離散時間Markov連鎖でモデル化する方法を確立した。

(2) 手術室運営を効率化するための手術予定作成における術式指定の自動化

横浜南共済病院の協力を得て、同病院における手術実施データ(患者名・年齢・手術名称・手術部位・麻酔種別等を含む)の提供を受け、手術スケジューリングに係る一連の作業工程を、手作業からできるだけ自動化・効率化する方法の開発を始めた。

同病院においては、各診療科の医師による手術申込で電子カルテに記載された診療報酬上の術式名や手術部位等をまとめて、毎週の手術予定表に記入する簡易術式名称(以下で、予定術式と呼ぶ)に変換する作業が看護事務職員・看護師の大きな負担になっている。研究代表者と同病院手術室の北川郁代看護師長は、手術スケジューリングの全体の効率化には、まずこの自動化が必須と考え、本研究に取り組んだ。

本研究における申込術式から予定術式への自動変換の試みでは、医学・医療の専門知識を用いず、過去における両術式間の対応事例を統計的に分析し、その結果を利用して、毎週、新たに与えられる申込術式に対して予定術式を推定することを目指した。申込術式名称は不定文字数の非構造化データである。そのために、術式の形態素解析、データマイニングにおけるトピックモデル等の方法を利用することが考えられる。しかし、現場スタッフの理解と利用可能な計算機環境を考慮して、Excelの操作と関数だけで推定できる方法を試作した。

提案方式では、診療科ごとに、まず、過去の一定期間における全手術で使われた予定術式の重複しないリストと、申込術式(特殊文字を削除後)に使われた「文字」の重複しないリストを作成する(単純に1文字ずつに分解する)。次に、各文字が使われた申込術式に対応する予定術式について、文字毎に使用頻度を計算する。その結果にBayesの定理の方法を適用して、新しく与えられた申込術式に含まれる文字から、最も対応しそうな予定術式名称を推定する。ここで、各文字の出現頻度から、一連の文字で構成される予定術式の確率を求める工夫が必要である。

この方法を泌尿器科の手術に適用した。協力病院における2016年度の泌尿器科の手術は700件を超えるが、予定術式(基本形)は53件、申込術式で使われた重複しない文字は僅か137字であった。これらのデータから作成した各文字の使用頻度に基づいて、2017年度前期における泌尿器科の申込術式454件(重複を除くと52件)のうち実施された手術の申込術式397件(重複を除くと44件)について、予定術式(基本形)の予想が実際の予定術式とどの程度一致したかを検証した(新しい予定術式も11件あった)。更に、予定術式(基本形)に元の申込術式から必要情報を捕捉して、週間手術予定表で使われる予定術式(現実形)を作り出した。

以上の研究成果は、2017~2019年度科研費研究期間に、サービス学会の国内・国際学会、及び日本手術医学会総会において口頭発表する。

(3) 待ち行列モデルの理論的研究
理論的研究として、ヒトにサービスするシステムの特徴をとらえた「複数のサーバが客の優先度に応じた順序に従ってサービスを行い、待ちきれなくなった客が離脱することがある待ち行列モデル」の確率過程理論による解析に焦点を当てた。同じ優先度の客どうしでは、先着順にサービスされる場合と後着順にサービスされる場合を解析し、更に、優先度が高い客によるサービスの割り込まれ方として、「サービス中には割り込まない」「非割り込み式」の場合は解析が完了し、サービス中でも割り込む「割り込み式」の場合について、解析を進めた。

病院の入院患者への応用では、「客」が患者に、「サービス」が手術に、「サーバ」が手術室に対応する。また、「待ち切れなくなった客の離脱」は、死亡退院に相当する。

客の到着はPoisson過程に従い、サービス時間と待合せ放棄までの待ち時間がともに(異なる平均値をもつ)指数分布に従うと仮定する待ち行列モデルの確率過程を解析するに際して、離散時間出生死亡過程における初到達時間の理論を用いた新しい解析方法を発見した。その結果、従来は客の待ち時間やサービス時間について、それらの平均値や分布のモーメントしか計算できなかったものが、確率分布関数をラプラス変換の形で明示的に得ることに成功した。結果の理論式は全て数値計算ができる。

一連の研究成果は、待ち行列理論に関する国内外の研究集会で発表するとともに、海外の審査付き論文誌Journal of Industrial and Management OptimizationやInternational Journal of Pure and Applied Mathematics等に投稿して掲載された。特に、The 11th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA2016), December 13-16, 2016, Wellington, New Zealandで発表した論文(学会発表)がBest Paper Awardを受賞した。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

Takagi Hideaki, Kanai Yuta, and Misue Kazuo, Queueing network model for obstetric patient flow in a hospital, Health Care Management Science, 査読有, Vol.20, 2017, 433-451 DOI: 10.1007/s10729-016-9363-5

Takagi Hideaki, Unified and refined analysis of the response time and waiting time in the M/M/m FCFS preemptive-resume priority queue, Journal of Industrial and Management Optimization, 査読有, Vol.13, 2017, 1945-1973, DOI: 10.3934/jimo.2017026

Takagi Hideaki, Waiting in the M/M/m LCFS nonpreemptive priority queue with impatient customers, Annals of Operations Research, 査読有, Vol.247, 2016, 257-289 DOI: 10.1007/s10479-015-1876-7

Takagi Hideaki, Analysis of the response and waiting times in the M/M/m LCFS preemptive-resume priority queue, International Journal of Pure and Applied Mathematics, 査読有, Vol.109, 2016, 325-370 DOI: 10.12732/ijpam.v.109i2.12

Takagi Hideaki, Waiting time in the M/M/m LCFS nonpreemptive priority queue with impatient customers, Annals of Operations Research, 査読有, Vol.247, 2016, 257-289 DOI: 10.1007/s10479-015-1876-7

Kawai Yosuke and Takagi Hideaki, Fluid approximation analysis of a call center model with time-varying arrivals and after-call work, Operations Research Perspectives, 査読有, Vol.2, 2015, 81-96 DOI: 10.1016/j.orp.2015.03.003

Takagi Hideaki and Taguchi Yutaro, Analysis of a call center with impatient customers and after-call work, International Journal of Pure and Applied Mathematics, 査読有, Vol.90, 2014, 205-237 DOI: 10.12732/ijpam.v90i2.10

Takagi Hideaki, Waiting time in the M/M/m/(m+c) queue with impatient customers, International Journal of Pure and Applied Mathematics, 査読有, Vol.90, 2014, 519-559 DOI: 10.12732/ijpam.v90i4.13

Takagi Hideaki, From computer science to service science: queue with human customers and servers, Computer

Networks, 査読有, Vol.66, 2014, 102-111 DOI: 10.1016/j.comnet.2014.03.014

Takagi Hideaki, Waiting time in the M/M/m FCFS nonpreemptive priority queue with impatient customers, International Journal of Pure and Applied Mathematics, 査読有, Vol.97, 2014, 311-344 DOI: 10.12732/ijpam.v97i3.5

[学会発表](計 12 件)

高木英明, Distribution of the waiting and service time in an M/M/m preemptive-resume priority queue with impatient customers, 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, 2018

高木英明, Distribution of the times to service completion and abandonment in the M/M/m preemptive LCFS queue with impatient customers, 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, 2017

高木英明, 待合せ放棄がある M/M/m 割込み型優先処理待ち行列における客の滞在時間分布の解析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017 年春季研究発表会, 2017

Takagi Hideaki, Waiting and service time of a unique customer in an M/M/m preemptive LCFS queue with impatient customers, The 12th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA 2017), 2017

Takagi Hideaki, Times to service completion and abandonment in the M/M/m preemptive LCFS queue with impatient customers, The 11th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA 2016), 2016

Takagi Hideaki, Detailed analysis of the response time and waiting time in the M/M/m FCFS preemptive-resume priority queue, The 10th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA 2015), 2015

Takagi Hideaki, Queueing theories for science of services, The 10th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA 2015), 2015

高木英明, 待ち行列理論に魅せられて, 日本 OR 学会 2014 年度確率モデルシンポジウム, 2015

Takagi Hideaki and Kanai Yuta, Little's law applied to the obstetric patients in a hospital, 日本 OR 学会 2014 年度確率モデルシンポジウム, 2015

Takagi Hideaki and Kanai Yuta, Queueing network model for the

obstetric patient flow in a hospital,
Mayo Clinic Delivery Science Summit
2015, 2015

高木英明, 待合せ放棄のある非割込み型
優先処理待ち行列の待ち時間, 日本 OR 学
会 2014 年秋季研究発表会, 2014.

Takagi Hideaki, Misue Kazuo, and Kanai
Yuta, Queuing network model and
visualization for the patient flow in
the obstetric unit of the University of
Tsukuba Hospital, SRII Global
Conference 2014, 2014.

〔図書〕(計 2 件)

Takagi Hideaki, Okada Yukihiro,
Yoshise Akiko, and Shigeno Maiko,
Creation of service science curriculum
for customer-oriented business
innovation, Global Perspectives on
Service Science: Japan, Springer, 2016,
313-336.

高木英明(編著) サービスサイエンスこ
とはじめ: 数理モデルとデータ分析によ
るイノベーション, 筑波大学出版会,
2014, 360 ページ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 英明 (TAKAGI, Hideaki)
筑波大学・システム情報系(名誉教授)・
名誉教授
研究者番号: 3 0 2 6 0 4 6 7

(2) 連携研究者

イリチュ(佐藤) 美佳 (ILIC-SATO, Mika)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 6 0 2 6 9 2 1 4

三末 和男 (MISUE, Kazuo)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 5 0 3 7 5 4 2 4

繁野 麻衣子 (Maiko, Shigeno)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 4 0 2 7 2 6 8 7