

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11186

研究課題名(和文)高利便性かつセキュアなシステムの設計および運用のための待ち行列ゲーム解析

研究課題名(英文)Queueing game analysis for a secure and highly usable system

研究代表者

佐久間 大(Sakuma, Yutaka)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群  
・准教授

研究者番号：00434027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、待ち行列システムにおいて客が利己的に行動を行うとき、客の意思決定の予測について評価を行うための数値計算アルゴリズムを開発した。その結果、システムが想定する理想的な解からのずれを定量的に見積もることを可能にし、高利便性かつセキュアなシステム設計を行うための性能評価指標の1つを得ることができた。さらに、平面領域を対象とした警備資源の配分問題にも取り組み、その問題と待ち行列ネットワークの解析手法との関連性についても考察を行った。その結果、待ち行列ネットワークにおける時間依存型の客存在確率分布と数理最適化の手法を併せた資源配分方法について開発を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、従来の待ち行列理論に加えてゲーム理論の考えも取り入れた待ち行列ゲームを提案することで、待ち行列のサービス資源が客の意思決定に及ぼす影響の分析を可能にした。さらに均衡を実現する意思決定について、客がどのように待ちの経験を活用することで再現するかについても考察しているため、学術的意義が大きい。この待ち行列ゲーム解析は、混雑発生タイミングの予測を与えるため、客の利便性だけでなくセキュリティ向上に活かすことが期待されるため、社会的意義がある。最後に本課題では、待ち行列解析の警備資源の効率的配分への応用についても考察しているため、学術のみならず社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we consider queueing models to design a secure and highly usable system. To this end, we first consider a queueing game, and obtain the strategic behavior of customers in equilibrium, which is shown to deviate from the system manager's ideal. We then consider an allocation problem of security resources in the two dimensional space. Specifically, we use a queueing network with infinite servers to compute a threat probability distribution on the space, and give an efficient way to allocate the security resources as a solution of the mathematical programming.

研究分野：待ち行列理論

キーワード：待ち行列理論 ゲーム理論 エージェント・ベース・モデル セキュリティシステム 資源配分

## 1. 研究開始当初の背景

近年の不安定な国際情勢を受け、様々な分野でセキュリティの強化は重要視されている。セキュリティの強化は、悪意のある第三者からの攻撃・侵入を阻止できる一方、多くの場合、システム内の混雑を招き、一般利用者の利便性を下げかねない。また、セキュリティを強化するための人的・物的資源には限りがあることが多く、限られた資源の中でシステムの利便性を維持しつつ、効果的なセキュリティを実現する方法の解明に関する研究は少ない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、限られた資源の中でシステムの利便性を維持しつつ、効果的なセキュリティを実現するために、現象をモデル化しその解析方法を開発することである。特に本研究では、待ち行列理論とゲーム理論の考え方を融合した待ち行列ゲームを用いて、サービス資源に関する不確実情報がシステム利用者の行動および混雑現象に与える影響を明らかにし、不確実情報下におけるシステムの効率的かつセキュアなシステム設計するための知見を与えることを目指す。上記に加えて本研究では、待ち行列理論の手法のみならずオペレーションズ・リサーチにおける数理最適化等の他の手法も用いて、利用者の不確実行動が与えられた下で、効率的なシステム資源を配分するための現象のモデル化および効率的な資源配分方法も与え、システムのセキュリティ向上に寄与することを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 待ち行列ゲームと均衡を実現する利用者の戦略を導く数値計算アルゴリズム：サービス提供者からシステムの到着客に対して、受付期間やサービス時間分布などの資源情報が周知された下で、利用者が自身の目的関数の最適化を目指して戦略を選択する様子を、待ち行列ゲームとしてモデル化し、均衡を実現する客の戦略を導く数値計算アルゴリズムを構築する。

(2) 待ち行列ゲームの均衡解の再現性を考察するためのエージェント・ベース・モデル：待ち行列ゲームの解の再現性について、現実の待ち行列においてどのような場合に再現しうるのかを考察するためのエージェント・ベース・モデルを構築する。特にここでは、各エージェントが自身の待ちに関する経験を蓄積しそれを活用する様をモデル化する。

(3) 利用者行動の不確実性が与えられた下でセキュリティ向上に寄与するシステム資源配分：利用者の不確実性考慮した行動予測を与えた下で、セキュリティ向上に寄与する効率的なシステムの資源配分を求める。特にここでは、不審者も含む利用者が2次元平面上で移動する様を時空間ネットワークでモデル化し、さらに、待ち行列ネットワークの過渡解析を応用することで、不審者の存在確率分布を求める。そしてシステムの警備資源の効率的な配分方法を得るために、数理最適化の手法を適用する。

## 4. 研究成果

(1) 待ち行列のサービス資源が利用者行動に与える影響の待ち行列ゲーム解析：待ち行列システムにおけるサービス資源が利用者行動(ここでは客の到着パターン)に与える影響を明らかにするために、待ち行列ゲームによる定式化の方法を示し、均衡を実現する客の到着パターンを得るための数値計算アルゴリズムを与えた。ここでは特に、到着客に対する受付期間の長さ、客の要求サービス時間分布、さらに、サービス時間に対する客ごとの異なる信念を入力とし、均衡を実現する客の到着パターンを出力とする数値計算アルゴリズムを得た。

(2) 待ち行列ゲームにおける均衡解の再現性を考察するエージェント・ベース・モデル：待ち行列ゲームにおける均衡を実現する到着パターンについて、現実の待ち行列システムにおける再現性を考察するために、各客が自身の目的関数(ここでは待ち時間)の最適化を目指し経験を積み重ねそれを活用するエージェント・ベース・モデルを構築し、その到着パターンの再現性について考察を行った。そして、エージェント・ベース・モデルにおいて十分な時間が経過後、客の到着パターンが待ち行列ゲームの均衡解に類似することを示した。このことから、日常生活における利用者の待ちの経験の積み重ねとその活用の結果として、待ち行列ゲームの均衡解が再現し得ることを数値実験により示すことができた。

(3) 不特定多数の利用者が行き交う2次元空間における効率的な警備経路：不特定多数の利用者(ここでは歩行者)が行き交う2次元警備空間において、脅威を事前に取り除くための警備経路を数理的手法に基づいて導いた。特にここでは、警備空間を時空間ネットワークによりモデル化し、動的計画法を用いて警備者が出来るだけ多くの歩行者に接触および検査を行うための警備経路を導いた。

(4) 潜在的脅威を取り除くための待ち行列ネットワークを用いた警備資源配分：平面領域における不審者等の潜在的脅威が移動する様を確率現象として捉え、領域上の不審者の時間依存型の存在確率分布を求め、不審者の発見確率を最大化するための警備資源の配分方法を与えた。特にここでは、不審者の移動する様を無限窓口モデルからなる待ち行列ネットワークでモデル化を行い、それから得られる時間依存型の不審者存在確率分布を導き、そして、数理計画問題の解

として警備資源の効率的な配分方法を与えた。

(5)重要施設を含む都市ネットワークにおける不審者検問モデル：不特定多数の利用者が存在する2次元警備空間において、特定の要検問者が発生したときの警備に関する性能評価を行うためのモデルを提案した。特にここでは、重要施設が円形領域の都市ネットワークの中心に位置し、不審車両が円弧上に確率的に発生および重要施設に向かう状況を想定し、これを離散時間軸上の空間的待ち行列モデルとして定式化を行った。ここでは、その空間的待ち行列モデルの推移構造が M/G/1 型マルコフ連鎖となることを利用したシステム性能評価指標（不審車両を取り逃がす確率など）を導くための数値計算アルゴリズムを導いた。

(6)システム処理能力の動的変化が混雑に及ぼす影響の解析：システム運用者が混雑状況に応じて処理能力を変化させることは自然である。ここではその基礎的な解析の1つとして、窓口の休暇と系内仕事量に依存した処理速度をもつ M/G/1 待ち行列の定常解析を行った。特にここでは、サービス時間が相型分布に従う場合について、系内仕事量の定常分布を求める数値計算アルゴリズムを行列解析法の手法を用いて導いた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Ukai, Y. Sakuma, S. Kataoka	4. 巻 -
2. 論文標題 Search Scheduling with Delayed Information of Target missing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Scheduling 2023	6. 最初と最後の頁 -
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 T. Nakahara, Y. Sakuma, K. Yada, M. Wedel	4. 巻 50
2. 論文標題 The Impact of Checkout Congestion on Purchasing Behavior	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EMAC 2021. Proceedings of the European Marketing Academy	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） 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 該当する
1. 著者名 Y. Sakuma, O. Boxma, T. Phung-Duc	4. 巻 98
2. 論文標題 An M/PH/1 queue with workload-dependent processing speed and vacations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Queueing Systems	6. 最初と最後の頁 373--405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11134-021-09701-2	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 該当する
1. 著者名 L. Ravner, Y. Sakuma	4. 巻 97
2. 論文標題 Strategic arrivals to a queue with service rate uncertainty	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Queueing Systems	6. 最初と最後の頁 303--341
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11134-020-09683-7	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 該当する

1. 著者名 Y. Sakuma, H. Masuyama, E. Fukuda	4. 巻 283
2. 論文標題 A discrete-time single-server Poisson queueing game: Equilibria simulated by an agent-based model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 European Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 253--264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejor.2019.11.003	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 該当する

1. 著者名 Y. Sakuma, O. Boxma, T. Phung-Duc	4. 巻 11688
2. 論文標題 A Single Server Queue with Workload-Dependent Service Speed and Vacations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science, vol 11688. Springer, Cham.	6. 最初と最後の頁 112--127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-27181-7_8	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 該当する

1. 著者名 黒須敦史, 宝崎隆祐, 佐久間大, 鶴飼孝盛, 山田修司	4. 巻 62
2. 論文標題 捕捉者のいる搜索資源配分ゲーム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文	6. 最初と最後の頁 90--114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15807/torsj.62.90	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Sakai, R. Hohzaki, E. Fukuda, Y. Sakuma	4. 巻 268
2. 論文標題 Risk evaluation and games in mine warfare considering shipcounter effects	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 300--313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejor.2018.01.030	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10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中村祐輝, 鶴飼孝盛, 佐久間大, 片岡靖詞
2. 発表標題 搜索活動における効果的な経路と投入時間の導出
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2022年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Sakuma, O.J. Boxma, T. Phung-Duc
2. 発表標題 Moments for the stationary workload of an M/PH/1 queue with workload-dependent processing speed and vacations
3. 学会等名 EURO2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐久間大
2. 発表標題 受付期間のある待ち行列ゲームにおける均衡解
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 4部会・グループ合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐久間大
2. 発表標題 対領空侵犯措置における要撃機配備の待ち行列理論を用いた性能評価
3. 学会等名 令和3年度 航空研究センターシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐久間大, 鶴飼孝盛
2. 発表標題 不審車両検問システムの性能評価のための空間的待ち行列解析
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田朗弘, 佐久間大, 渡邊宏太郎
2. 発表標題 対領空侵犯措置における要撃機配備の待ち行列理論を用いた性能評価
3. 学会等名 2020年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富沢哲雄, 佐久間大, 江藤亮輔, 山田俊輔, 黒崎将広, 辻田哲平
2. 発表標題 動的な混雑環境における自動検問ロボットの最適移動戦略
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sakuma
2. 発表標題 Equilibrium arrivals to a queue with heterogeneous service-time beliefs
3. 学会等名 Queue and Games, Eurandom, The Netherlands (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐久間 大
2. 発表標題 窓口の休暇と系内仕事量に依存した処理速度もつ単一窓口待ち行列の定常解析
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会待ち行列研究部会，第286回部会報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sakuma
2. 発表標題 Equilibrium arrivals to a queue with heterogeneous service-time beliefs
3. 学会等名 待ち行列およびゲーム理論に関する特別セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018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
---------	---------