

待ち行列ネットワークによる介護施設センサデータ 送信システムのモデル化

西村 勇亮^{†1} 井上 創造^{†1}

概要: 近年, ウェアラブルデバイスを用いて人の動きを計測する活動認識の研究が進んでおり, データを確実に収集することが重要となっている. しかし, 介護施設では通信設備が整っていることが少なく, 収集するデータが滞る問題が起きている. そこで本論文では, 回線強度が保証されていない状況下でもアプリケーションがデータを送信できるようなパラメータを得ることを目的としている. そのために待ち行列理論を用いてファイル送信システムをモデル化し, データ転送に最適なファイルサイズ, データ送信頻度を検証した. その結果, モデルの精度は実機実験にて 10 %の誤差となり, パラメータを最適化することでファイルの待ち時間を 44 %削減できることが確認できた.

Modeling of Sensor Data Transmission System for Nursing Homes by Queueing Network

YUSUKE NISHIMURA^{†1} SOZO INOUE^{†1}

1. はじめに

本論文は, 介護行動認識システムにおけるデータ送金の効率化を行うための, 待ち行列ネットワークモデル化の研究について述べる.

1.1 概要

近年, スマートフォンをはじめとするウェアラブルデバイスの爆発的に普及によって, 人々の生活における IoT 化が進んでいる. ウェアラブルデバイスの市場規模は, 2015 年に国内で約 209 万台, 2020 年には国内で約 1,160 万台まで増加すると予測されている [1]. スマートフォンには, 多くのセンサが内蔵されており, 心拍数, 歩行数, 消費カロリーなどの日々の活動をデータとして収集することができ, すでに健康管理, スポーツ, 医療等の分野で活用されている. センサから人間の様々な行動を認識するセンサ行動認識技術を用いた行動認識が盛んに研究されている. ユビキタスコンピューティングの分野では, スマートフォンなどのモバイルセンサを使用した, 行動認識技術による研究が行われている.

行動認識では, 対象者の歩く, 物をとる, 料理をするなどの行動をセンシングし, そのデータから機械学習を用いて規則性や周期性を明らかにすることによって, 行動の認識や推定を行うことができる. 本研究ではこの技術を介護分野に応用する研究を行っており, 介護記録の自動作成による業務の効率化及び, 介護記録を視覚化できるシステムの構築を目標としている. センサデータから行動クラスを推定する行動認識の概要を図 1 に示す. このシステムを実現するために, 活動記録を介護記録システムに統合するアプリケーションを開発しており, このアプリケーションでは介護士に業務記録を簡易的に入力できると同時に, 介護士の行動データを収集できる. アプリにより収集された介護行動記録データは, 機械学習を用いた行動予測に利用されるため逐一サーバーに送信されている. このシステムは, データ収集も兼ねて実際にいくつかの介護施設で実証実験として導入されており, 介護士にアプリを使用してもらっている. しかし, 通信環境を十分に整備されていない介護施設が多く, 介護士は常に施設内を移動しながら業務を行っているため, デバイスがオフラインになる現象が頻発している. これにより, デバイス内のデータが介護記録システムのサーバーに送信されずにデバイス内ストレージ

^{†1} 現在, 九州工業大学生命体工学研究科

に蓄積され続け、アプリケーションの動作が遅くなり業務記録のデータ収集が困難になっていることが問題となっている。そこで、アプリ上のデータ送信システムにおいて設定できる、生成されるファイルサイズ、送信頻度などの最適なパラメータを決めることでデータファイルが溜まる問題が解決できるのではないかと考えられる。

現在のシステムでは、スマートフォンの回線状況が良好ではない状況下でセンサデータが端末内に溜まり、アプリの運用に悪影響を及ぼしている。そこで本稿では、アプリ内におけるデータ送信システムを待ち行列ネットワークモデルとして定義し、待ち行列理論を用いた計算に必要なパラメータの計算を行う。実証実験でスマートフォンを使用した実験により、提案した待ち行列モデルの有用性を評価した。提案モデルによって算出した待ち時間は 31.7[s]、実験によって計測された待ち時間は 28.6[s] となり、誤差は 10 % となった。また、提案モデルによって算出された最適なファイル送信頻度 f 、ファイルサイズ B を適用すると、計算上待ち時間が 44 % 削減できるという結果を得た。

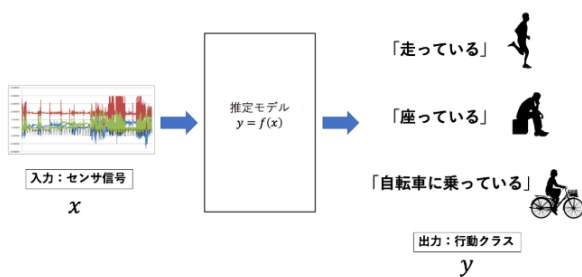


図 1 センサデータから行動クラスを推定する行動認識

1.2 論文の構成

本稿は次の構成となっている。まず、第 2 章にて本稿の研究背景について述べる。その後、第 3 章では、本稿で提案する待ち行列ネットワークモデルについて説明する。第 4 章にて提案手法の評価、提案手法による最適なパラメータの算出を行う。第 5 章にて考察を述べ、第 6 章結論、今後の課題について述べる。

2. 背景

本章では、本研究の対象となるシステムや、研究背景について説明する。また、待ち行列理論に関して [2][3] を参考にしている。

2.1 行動認識

行動認識とは人間の行動を様々なセンサでセンシングし、得られたデータから人間の行動を推定する技術である。人間の行動を客観的に計測できるようになれば、様々な分野での応用が期待される。例えば、医療分野において、人の

日常的な行動を客観的に計測することで生活習慣病の予防を期待できる [4]。ダンスのスキル評価では、手本となる行動と対象の行動の類似度を数値化して評価することができる [5]。他にも労働者のプロセス管理 [6] など、幅広い分野で研究されている。これまで人間の行動センシングは困難であったが、近年のスマートフォンをはじめとするウェアラブルデバイスの急速な普及によって人々の生活における IoT 化が進んでいる。スマートフォンの性能向上は著しく様々なセンサが搭載されており、スマートフォンが普及する要員のひとつと言える。ウェアラブルデバイスの市場規模は、2015 年に国内で約 209 万台、2020 年には国内で約 1,160 万台まで増加すると予測されている。このようなデバイスの普及に伴って、行動認識技術の研究が盛んに行われている。本研究室では主にスマートフォンに搭載されている加速度センサから得られたデータを使用した行動認識を行っている。

行動認識には一般的に教師あり学習が用いられている。教師あり学習は、学習データに正解ラベル付きデータを使用して学習させる手法である。教師あり学習は、学習データに正解ラベル付きデータを使用して学習させる手法である。教師あり機械学習を使用して行動認識を行うためには、多くのデータを収集する必要がある。しかし、センサデータの収集は被験者及び観測者の時間的身体的負担が大きいため、センサデータの収集と同時にラベル付けを行うシステムが必要となる。この問題を解決するために、本研究室ではスマートフォンアプリの「Gtolog」を開発しており、介護士の介護記録を効率化すると同時に介護士の行動データの収集を実現している。

2.2 行動認識システム

次に、本研究室が開発しているスマートフォンアプリ「Fonlog」について説明する [7]。

介護施設では、介護士が行なった全ての介護内容を、介護記録として作成する必要がある。例えば、何時何分などの介護士がどの利用者に対してどのような介護業務か、その時の利用者の様子を詳細に記入する。これは法律によって、介護事業者は利用者の状態、ケアの内容を記録し保管しなければならないことが定められており、介護士にとって必要不可欠な業務の一つとなっている。また、経済産業省が公開している資料 [8] によると現在、多くの介護施設では手書きで行っており、介護記録は介護士の業務負担割合の 8.9 % を占めている。また、経済産業省の報告書では、介護記録を ICT 化したときの導入効果を試算している。それによると、介護記録が ICT 化によって効率化されかかる時間が 40 % になると仮定した場合、職員人数が約 2.5 人の施設では 1 日あたり 5.10 時間の労働時間短縮効果が見込まれている。それによる時間短縮効果を職員の給与に換算した場合、システム導入によるコストと比較して介護施



図 2 Fonlog のアプリ UI

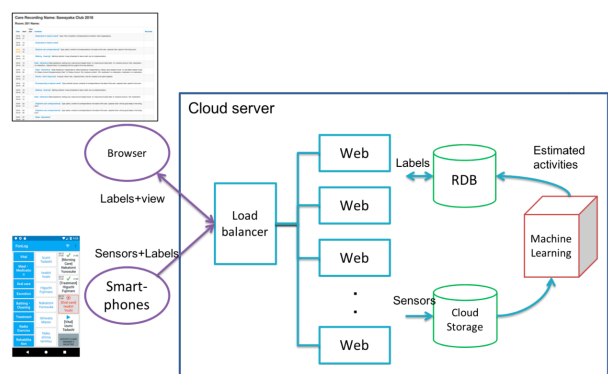


図 3 行動認識システムのネットワーク構造

設における経済効果の方が高くなることが示されている。

このシステムのもう一つの目的は、介護行動データの収集である。スマートフォンでは、様々なセンサが搭載されているが、利用者のプライバシーの観点から Fonlog ではデータ収集を行うデバイスとしてスマートフォンを使用しており、利用者のプライバシーの問題を考慮して加速度センサデータのみを使用している。

Fonlog のユーザーインターフェースを図 2 に示す。左の列で行動ラベル、中央の列で対象者が設定でき、右の列で行動の再生ボタンが作成される。また、再生ボタンを長押しすることでケア記録の詳細情報を記録することができる。ユーザーとなる介護士は、指定した介護業務を始める際に再生ボタンを作成・再生し、その業務が終わったときに再生ボタンを停止させる。そうすることで、収集しているセンサデータにラベルづけされると同時に、介護記録が行われる。また、Fonlog ではラベルデータ、詳細データ、センサデータの三種類のデータが生成される。これらのデータは、介護施設に置かれている wi-fi ルータ経由で、クラウド側に送られる。そのネットワークの概要を図 3 に示している。クラウドサービスでは認証と web インターフェースを提供すると同時に、定期的に送られたデータによって機械学習を行い、行動認識モデルを訓練し、ラベルの与えられていないセンサに対して行動認識を行うことができる。

2.3 システム上の問題点

本研究室のプロジェクトでは、この Fonlog を使用したシステムを用いた実証実験をいくつかの施設で行なっている。介護施設では、ネットワーク環境の整備が十分ではない場合が多いため、回線速度が遅いことが多く不安定になることが多い。また、スマートフォンを持つ介護士は、業務を行う上で施設内を移動するため頻繁に端末がオフライン状況になる。これらの原因によって、センサデータの正常な送信、端末内に送信待ちのデータファイルが大量に蓄積するという問題が生じている。実際にこれらの問題が起これば、実証実験でいくつかの弊害が起きている。アプリのストレージ内にデータファイルが過剰に蓄積することで、アプリの動きや応答が遅くなりユーザーが介護記録に時間がかかるようになり、使うことがストレスになる。また、ラベルデータや詳細データの送信が遅くなると、リアルタイムで介護記録を web 上で確認できなくなり、データがサーバーに送られなければ機械学習を行うことも出来ないため、機械学習による行動認識が正常に行われなくなる。その上、データが大量に溜まったクライアントが多く存在するとサーバが混み合い、処理落ちを引き起こす原因となる。これらの問題を解決するためにセンサデータを送信するシステムをより効率化が必要であると考えられる。

2.4 研究の目的

本研究では、データ送信システムの効率化をするために、システムに置いて設定できるパラメータを最適な値にすることを目的とする。今回用いる Fonlog では、ファイルあたりのデータ容量やファイルを送信する頻度の値をアプリ側で設定することが可能である。これらの適した値を求めることができれば、データファイルが滞りなく送信できるシステムを設計できると考えられる。その値を求めるためにデータ送信システムを待ち行列モデルとしてモデリングし、数理的に解いていく。

2.5 待ち行列理論

待ち行列理論は、共有資源に対する利用要求が確率的に発生するという仮定の下で、資源競合問題を抽象化した数学モデルの構築と解析に関する理論であり、システムの設計や運営に役立つことを目指している [9]。待ち行列理論の研究は、1900 年代始め、電話網の処理能力を評価するためにデンマークの電話会社設計技師 A.K Erlang が行なった研究から始まった [10]。応用研究では、1950 年代から生産システム、流通システム、交通システムなどの様々な分野に使われるようになった [11][12]。また、通信分野では、1970 年にはデータ通信や LAN、1980 年代初めには ATM 方式や移動通信網、近年ではインターネットと通信の発展に伴って待ち行列の応用研究も進められている。イ

インターネットの通信分野ではデータがパケットと呼ばれる細かい単位に分割され、ルータを介して通信相手に送信される。このシステム内のトラフィックをネットワーク階層ごとにモデリングして待ち行列理論を用いて計算できる形にする研究 [13] やネットワーク内の遅延時間を評価する研究 [14] などにも待ち行列理論が用いられている。また、モバイル端末とサーバ間の遅延を削減するためのエッジコンピューティング [15] や新たなルーティングプロトコル [16], CSMA アルゴリズム [17] も提案されている。センサデータネットワークに関して、サーバ効率 [18] やトラフィックのモデル化 [19] の研究も進められている。

以上のように、モバイルネットワークやセンサネットワークに関する遅延問題やパフォーマンスの向上を目的とした研究は盛んに行われてきたが、モバイル端末からセンサデータが頻繁に送信されるモデルでパラメータチューニングを数理的に解いて最適化する試みは行われていない。また、待ち行列理論を用いて最適化されたシステムの性能評価は一般的にプログラム上でのシミュレーションによって行われ、実際のシステムを用いた実験では評価は行われない。実際の現場では非常に複雑で多くのパラメータが待ち行列システムに対して影響を与える場合が多いため、待ち行列理論で定めた規則に従って運用すると大きな誤差が生じる。そこで本研究では、実際に運用する介護施設で影響のあるパラメータをできる限り待ち行列理論の式に含めて計算することで、現場でも適用可能な値を算出し、実機による実証実験において有用性が裏付けられることを目指す。

3. 提案手法

本章では 2 章で述べた研究の目的を達成するために、提案する手法について述べる。3.1 節では今回用いる待ち行列理論についての説明、3.2 節では待ち行列理論を介護記録システムに応用したモデルの説明を述べる。

3.1 待ち行列理論

ここでは待ち行列理論について説明する。現実の待ち行列を数理的に分析するためには、待ち行列のもつ多様な特徴を抽象化して、表現するモデルを構築する必要がある。待ち行列モデルに必要な用語を今回のシステムを例に定義する。アプリ内のシステムではセンサデータを入れるデータによりファイルが生成され待ち行列に並び、そして先に生成されたファイルから順にデータがアプリからクラウドに送信される。ファイルが生成されて待ち行列の最後尾に並び動作を到着と呼び、ファイルの送信を実行する部分を窓口と呼ぶ。また、1つのシステムに窓口は1つ以上存在する。窓口を訪れるものは客と呼ばれる。ここで、待ち行列から抜けるときに窓口で行われる仕事（今回の場合ファイルの送信）をサービスと呼ぶ。待ち行列を作って待つ場

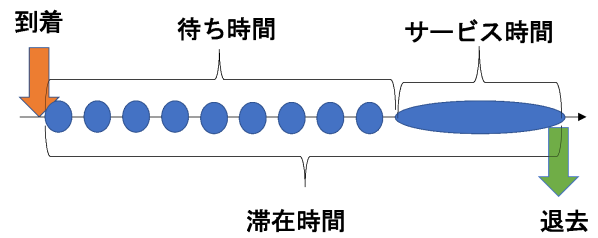


図 4 待ち行列における評価指標

所を待ち室と呼ぶ。待ち室の容量は現実に沿って、有限として扱うこともあるが無限の広さとして考えることも多い。窓口でサービスを受け終わった客は待ち行列から退去する。この待ち室と窓口を含む全体を待ち行列システムと呼ぶ。待ち行列理論では、客の到着を到着過程としてモデル化し、サービス量は確率変数とみなす。サービス量は「時間」の単位を用いて表すのでサービス時間と呼ぶ。またサービス時間はどのような分布関数にしたがっているかを指定する必要がある。したがって、待ち行列モデルは客の到着過程、サービス時間分布、窓口の数、待ち室の容量によって特徴付けられている。またサービス規律と呼ばれる、サービスの順番に関する規則も指定する必要がある。

3.2 待ち行列における評価指標

待ち行列の混雑の状況や待ち行列システムの性能をいくつかの指標で定量的に評価することができる。客が窓口でサービスを受けるまでに待たされた時間、または並び始めてから退去するまでの時間などの客の経験を基とした評価指標が代表的である。滞在時間は客が待ち行列システムに到着してから、窓口でサービスを受け終わってシステムから退去するまでの時間で定義される。待ち時間は待ち室で客が待機する時間であり、滞在時間とサービスの差である。これらの用語の関係性を図 4 に示す。

3.3 待ち行列の計算式

この節では、待ち行列を計算する上で必要な公式を示す。ここでは、単位時間あたりの到着する客数（到着率）を λ 、単位時間あたりにサービスを終える客数（サービス率）を μ で示す。そこで利用率 ρ を以下式 1 に示す。

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (0 < \rho < 1) \quad (1)$$

また、 $\rho < 0$ のとき $\lambda = 0$ であるため客が到着せず待ち行列が発生しない。 $1 < \rho$ になるとき $\mu < \lambda$ であるため、客の退去より到着の方が多くなるため待ち室内の客数が無限大に発散してしまう。そのため、 ρ は 0 より大きく 1 より小さい範囲で定義される。また、待ち室の客数つまり待ち行列長を L とする。待ち行列長 L は利用率を用いて式 (2) のように表す。

$$L = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (2)$$

一人あたりにかかるサービス時間はサービス率の逆数 $1/\mu$ となりそれに d , 客の待ち時間 Wq は式 (3) のように表される。

$$Wq = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} \quad (3)$$

3.4 システムのモデル化

2.2 節では、行動認識システムの介護行動データ収集について述べた。その構造を図 5 に示す。介護施設で収集された行動データがアプリ内に一時保存され、順番にクラウドに送信されている。このアプリ内のファイル送信システムに待ち行列理論を適用させるために、アプリ内の待ち行列システムをより細かくモデル化する必要がある。本節では、待ち行列モデルには実用した際に必要な行動認識システムのモデリングやパラメータについて述べる。待ち行列モデルで使用するパラメータを表 1 に示す

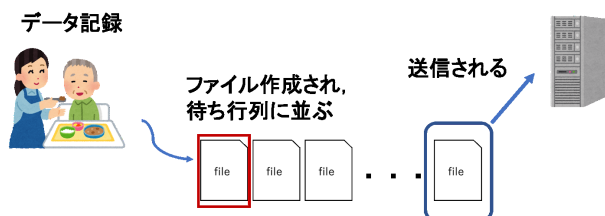


図 5 センサデータを収集してサーバに送られるまでのシステム

3.5 今回使用するパラメータ

今回使用するパラメータを以下の表に示す。また、各パラメータについての説明を述べる。

表 1 待ち行列モデルで使用するパラメータ

パラメータ名	記号
センシング頻度	a
アプリ上での送信頻度	f
タイムアウト時間	tc
ファイルサイズ	B
オンライン率	O
回線容量	s
送信成功率	C
サーバの I/O 処理速度	p
オーバーヘッド時間	h

センサデータ (a)

スマートフォンの加速度センサによって、センシングされた単位時間あたりのデータ量を a とする。加速度センサデータは、常に一定の周波数で計測され、ファイルに格納される。単位は kB/分。

タイムアウトするまでの時間 (tc)

スマートフォンとサーバとの接続が失敗して、タイムアウトとしてエラーが返ってくるまでの時間を定義しており tc とする。単位は秒。

アプリ上での送信頻度 (f)

アプリ上で設定されるデータファイルの送信頻度を f とする。アプリで設定されるアプリ内のデータファイルがサーバに送信される頻度を示している。これも開発者で操作できるパラメータである。単位はファイル数/分。

ファイルサイズ (B)

加速度データを格納するファイルの容量をファイルサイズとし、 B とする。加速度データは一定の周波数でセンシングされるが、それをどれだけの容量のファイルに出力するかは開発者が設定することができる。単位は kB。

オンライン率 (O)

端末がオンライン状態にある比率をオンライン率とし、 O とする。節 2.3 でも述べたが、端末は基本的にユーザーとなる介護士が所持しているため、端末が不定期的にオンライン状態とオフライン状態で切れ変わっている。オフライン状態になると、センシングは継続的に行われるがデータの送信は出来なくなるためシステム上到着は発生するが、サービスの機能が停止することになる。

回線容量 (s)

回線容量は単位時間あたりに送信できるデータの容量であり、 s とする。実際にシステムが利用される介護施設ではネットワーク速度が遅い場合や端末と接続する電波が弱い場合があるためこのパラメータを考慮する。回線容量の単位は kbps(キロビットパーセック) や、Mbps(メガビットパーセック) で表すのが一般的であるが、データの単位を kB で統一するためにここでは、単位を kBps(キロバイトパーセック) とする。

送信成功率 (C)

送信が成功する確率を送信成功率と呼び、 C とする。1 ファイルを送信している途中で端末がオフライン状態になると、送信は失敗し次にオンライン状態に復帰したときにそのファイルを最初から送信しなければならない。1 ファイル送信するのにかかる時間を B/s で表わす。このファイル転送時間に比例して失敗率が上がる。また、 $0 \leq C \leq 1$ とするために定数 c をかけている。

$$C = 1 - \frac{B}{s}c \quad (4)$$

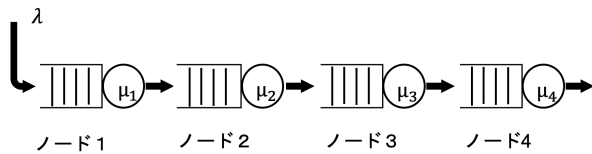


図 6 行動認識システムの待ち行列ネットワークモデル

サーバの I/O 処理速度 (p)

データファイルを受け取ったサーバは、データをストレージに書き込む。このときの処理速度を p とする。単位は KB/s とする。

オーバーヘッド時間 (h)

実際にデータを転送する時間に加えて、サーバーとの通信の確立や受信確認などにかかる余分な時間をオーバーヘッド時間とする。単位は秒である。

3.6 待ち行列ネットワーク

待ち行列ネットワークとは、複数の待ち行列システムが、直列、リング状、ネットワーク状に組み合わされた数学モデルである。コンピュータシステム、交通システム、生産システムなどの複合的なシステムは複数の資源がネットワークを構成して処理が行われる [20][21]。このようなシステムの評価をするために、待ち行列システムが複数組み合わせられたネットワークモデルを考える。また、待ち行列ネットワーク内において、結合された複数の待ち行列システムをそれぞれノードと呼ぶ。行動認識システムの待ち行列ネットワークモデルを図 6 に示す。

本研究では、図 3.3 に示したような fonlog のファイル送信システムを 3 つのノードが直列に連結した開放型の待ち行列ネットワークとしてモデリングし、システム効率化のためのパラメータ算出を行う。今回用いる待ち行列システムは全て、FIFO にしたがっており先に到着した客が先にサービスをサービスを行う。次に各ノードについての説明をする。

3.7 ノード 1

ノード 1 は、センサデータをファイルに格納する待ち行列システムを表している。到着する客は収集されたセンサデータであり、センサデータノード 1 の中でデータファイルに変換され退去する。単位時間に到着するセンサデータ量 a に対して、単位時間あたりにファイルサイズ B のファイルが生成される頻度が a/B で表わされる。そのとき、ノード 1 での到着率は λ 、サービス率は μ_1 と定義した。そのときの λ と μ_1 を以下式 5、式 6 に示す。

$$\lambda = a \quad (5)$$

$$\mu_1 = \frac{a}{B} \quad (6)$$

3.8 ノード 2

ノード 2 では、アプリで設定された頻度にしたがってデータファイルの送信を行う待ち行列システムを表している。到着する客はノード 1 で生成されたデータファイルであり、設定された頻度 f にしたがって送信される。しかし、ファイルの送信処理に B/m の時間が付加的にかかるため、 μ_2 の分母は $f + B/m$ と定義されている。ノード 2 での到着率はノード 1 のサービス率となり、サービス率は μ_2 とし以下式 7 に示す。

$$\mu_2 = \frac{1}{f + \frac{B}{m}} \quad (7)$$

3.9 ノード 3

ノード 3 では、ノード 2 でアプリから送信されるデータファイルに対する通信による遅延を考慮した待ち行列システムである。到着する客はノード 2 で送信されるデータファイルであり、通信に依存して送信頻度は常に変わっている。 s/B はスマートフォンが通信容量によって単位時間あたりにファイルが送信完了する頻度を表している。それに対して、ファイル送信中にオフラインが発生することなく送信が成功する確率 C 、全体の時間のうち送信処理が可能なオンライン状況になっている時間の比率 O をかけることで通信による影響を示している。ノード 3 の到着率はノード 2 のサービス率 μ_2 となり、サービス率は μ_3 とし以下式 8 に示す。

$$\mu_3 = \frac{1}{\frac{BCO}{s} + h + tc(1 - C)} \quad (8)$$

3.10 ノード 4

ノード 4 では、ノード 3 から送信されたデータを受け取り、それをクラウドストレージに書き込むまでの待ち行列を表している。ノード 4 の到着率はノード 3 のサービス率 μ_3 となり、サービス率は μ_4 とし以下式 9 に示す。

$$\mu_4 = \frac{p}{B} \quad (9)$$

3.11 計算式への適用

節 3.4 から節 3.8 で定義した値を式 1 から式 3 に適用し、各待ち行列システムの平均待ち時間や平均待ち行列長を算出する。ノード 1 はデータをファイルに格納する待ち行列モデルであり、今回目的としている、データファイルの待ち行列システムではないので、ノード 2,3 について計算を行う。

まず各ノードにおける利用率を ρ_2, ρ_3 とし、以下式 10, 式 11 に示す。

$$\rho_2 = \frac{a(f+B/m)}{B} \quad (10)$$

$$\rho_3 = \frac{(BCO)/s+h+t_c(1-C)}{f+B/m} \quad (11)$$

4. 評価

本章では、提案する待ち行列ネットワークを評価するために以下二つの観点から評価を行う。

- 実際に提案待ち行列ネットワークモデルを用いて計算した値と実測値が一致するか。
- 最適なファイルサイズ、送信頻度のパラメータを算出し、そのパラメータが実際に使うのに適しているか

4.1 では介護データ記録システムの実機テストを行う。提案システムを実際にユーザーが使用するスマートフォンを使用して評価することで、実際の運用で応用できる手法になっているかを評価する。

4.1 実機を用いた実験

本セクションでは、提案した待ち行列ネットワークの精度を評価するための検証実験と数値計算手法について述べる。この実証実験の目的は、提案するモデルが実際のシステムのパラメータを正確にできるかを評価する。

4.1.1 実験機器

実験に使うスマートフォンは、本研究室の介護施設での実証実験でも用いて「freetel P6」を用いる。また、実際の介護施設で起きている通信環境の不安定さを再現する必要があるため、プロキシソフト「charles」を用いて通信環境を設定した。今回、charles において以下 3 つのパラメータを使用する。

- Reliability
コネクションが完全に成功する比率。信頼性の低いネットワークをシミュレーションでき、意図的にパケットロストを発生させることができる。
- Stability
ネットワークの品質を低下させる比率。ジッタを発生させて定期的に品質が悪くなるネットワークをシミュレーションできる。
- 回線速度ネットワークの通信速度

4.1.2 理論

今回、実験によってスマートフォンを用意し acc データファイルサーバに受け取れるまでの時間を計測する。サーバに受け取られている時刻はサーバログから確認することができる。この時、ファイルがサーバに受け取られるまでの時間を Tr とし、サービス時間を T_{s2} とし、ノード 3 の待ち時間を W_{q3} とすると以下の式 12 として表すことができる。

$$Tr = T_{s2} + W_{q3} \quad (12)$$

実験によって求められる Tr の値と提案モデルを利用して算出した Tr の値を比較し、その値が近ければ提案モデルが現実的な値を算出できていると評価できる。

4.1.3 実験設定

提案モデルを用いて算出された式 (4.1) の Tr と実機テストによって、測定された Tr が等しい値になるかについて検証する。まず、5 台のスマートフォンを用意しその中に 1 ファイル 100kB で csv 形式の加速度データファイルを 500 個入れる。それぞれのスマートフォンをプロキシに繋ぎ、プロキシを回線速度: 32, Reliability: 90, Stability: 95 と設定する。この時、スマートフォンはオフライン状態にしておく。次に全てのスマートフォンを同時に、オンライン状態にし、データファイルのアップロードを開始する。この時、ファイルを受け取るセンサデータサーバのログを記録することで、通信が行われている頻度や成功しているかを確認する。

また、 Tr を算出するため待ち行列モデルに適用するパラメータを表 2 に示す。この設定されたパラメータの値は、最新版の「Gtolog」上の設定値と、介護施設に導入している通信状況を再現した値としている。センサデータ (a)、アプリ上での送信間隔 (f)、タイムアウト時間 (t_c)、ファイルサイズ (B) はアプリやサーバで実際に設定されている値を用いている。送信処理速度 (m)、オンライン率 (O)、送信成功率 (C) は計測できていないためおおよその値を仮定している。

4.1.4 実験結果

実験の結果、5 分毎に集計したスマートフォンのファイル送信数を図 4.1 に示す。スマートフォンはそれぞれ 1 から 5 の userID をもつ。図 7 からわかるように、ネットワークを不安定に設定しているため、ファイルの送信頻度が時間によって大きく変動しているのがわかる。しかし、待ち行列理論では待ち行列の定常的な特性を計算するため、それぞれのスマートフォンの平均的な値を評価基準として使用する。

設定したパラメータを利用して算出された Tr の値は 31.7[s]、実験によって得られた Tr の値は 28.6[s] となり、提案モデルが 10 % 高い値となった。

4.2 最適なパラメータ検証

本セクションでは表 2 のパラメータを用いて、最適なアプリ上での送信頻度 f とファイルサイズ B の値を検証する。 f の設定値は小さすぎると多くのファイルがスマートフォン上に溜まり、大きくしすぎるとノード 3 の通信の待ち行列長が大きくなりサーバへの負荷が大きくなる原因となる。また、ファイルサイズそのため適した f の値を設定

パラメータ名	設定値
センサデータ (a)	2.5[kb/s]
アプリ上での送信頻度 (f)	20[s]
送信処理速度 (m)	100[kB/s]
タイムアウト時間 (tc)	6[個/m]
ファイルサイズ (B)	100[kB]
オンライン率 (O)	90/100
回線容量 (s)	32[kBps]
送信成功率調整定数 (c)	0.03
オーバーヘッド時間 (h)	3[s]

表 2 実証実験で用いる各パラメータ

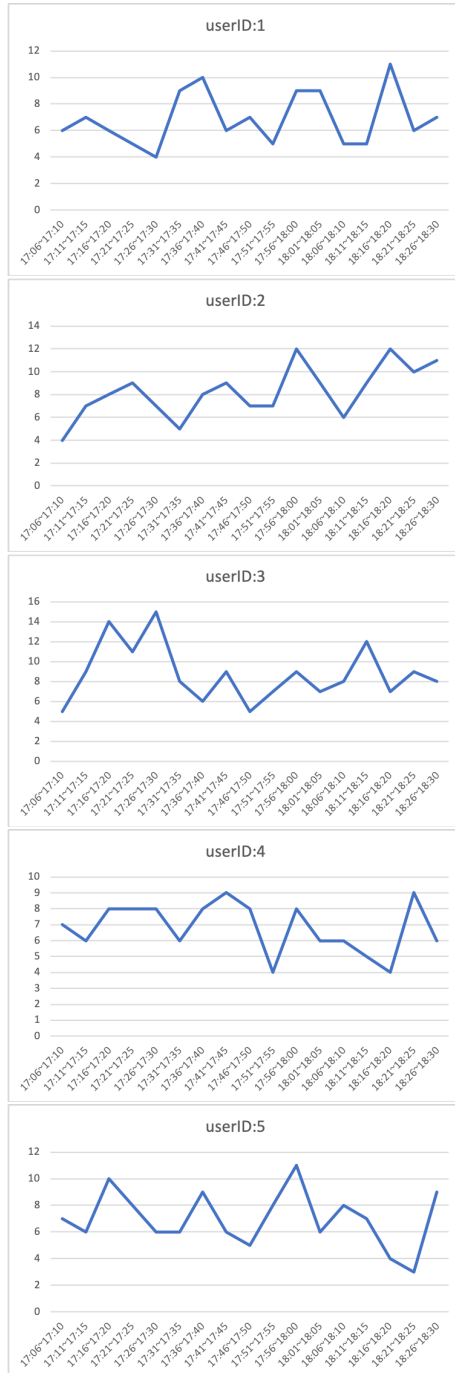


図 7 実証実験におけるスマートフォンの送信成功回数の推移
x 軸: 時刻, y 軸: 送信成功回数

する必要がある. f はノード 2, 3 におけるパラメータであるため, ノード 2, 3 の待ち行列システムを検証の対象とする.

4.2.1 パラメータ範囲の検証

まず, 待ち行列システムにおいて必ず $0 < \rho < 1$ が成立しなければならない. ノード 2 における利用率 ρ_2 , ノード 3 における利用率 ρ_3 がこの条件を満たすために $\mu_1 < \mu_2 < \mu_3$ が常に満たされていなければならない. そのため, f の値, B の値の取りうる範囲は, それぞれ以下の条件が成り立つ範囲である.

$$B\left(\frac{CO}{s} - \frac{1}{m}\right) + tc(1 - C) + h < f < \frac{B}{a} - \frac{B}{m} \quad (13)$$

$$B\left(\frac{CO}{s} - \frac{1}{m}\right) + h + tc(1 - C) < B \quad (14)$$

$$B < \frac{f - tc(1 - C) - h}{\frac{CO}{s} - \frac{1}{m}} \quad (15)$$

4.2.2 待ち時間によるパラメータの検証

待ち行列システムにおいて客の待ち時間の長さは, 評価指標の一つとなる. 今回はノード 2, 3 それぞれの待ち時間が最も小さい時のアプリ上での送信頻度 f , ファイルサイズ B を最も最適なパラメータとする. まず, 待ち時間を計算するために, 待ち時間を示す式 16 にノード 2 の利用率を示す式 10, ノード 2 のサービス率を示す式 7 を代入することでノード 2 の待ち時間を計算することができる. これを式 16 に示す. また同様にしてノード 3 の待ち時間を計算する式を式 17 に示す.

$$Wq2 = \frac{\rho_2}{\mu_2(1 - \rho_2)} \quad (16)$$

$$Wq3 = \frac{\rho_3}{\mu_3(1 - \rho_3)} \quad (17)$$

今回, ノード 2 とノード 3 の待ち時間の合計値において最小値となる時の f の値と B の値を最適なパラメータとする. ファイルサイズ B を式 14, 式 15 を満たす範囲内で, 送信頻度 f を x 軸, ノード 2 とノード 3 の待ち時間の合計

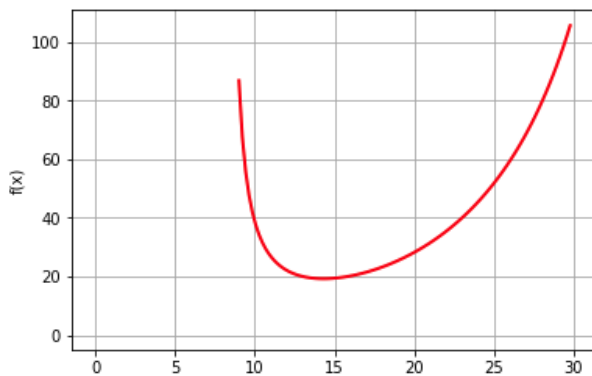


図 8 ノード 2, ノード 3 の待ち時間の合計 x 軸: アプリ上での送信頻度 f の値 [s], y 軸: 待ち時間 [s]

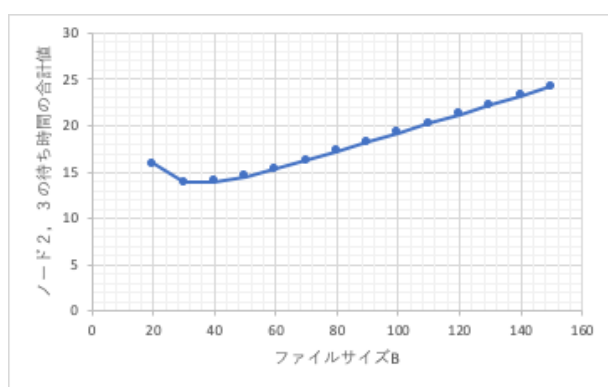


図 9 ノード 2, ノード 3 の待ち時間の合計の最小値 x 軸: ファイルサイズ B の値 [s], y 軸: 待ち時間 [s]

値を y 軸グラフを図 8 に示す。図 8 では $B=100$ としている。 B の値を 10 間隔で設定し、その時の待ち時間の最小値を図 9 に示す。この時 x 軸は B の値、 y 軸は f を最適値とした時の待ち時間を表す。

図 9 より $B=30$ のときに最小値 13.86 をとり、そのときのファイル送信頻度 f の値は 6.26 である。

また、比較対象として表 2 で示されている現在使用されているシステムのパラメータで、同様にノード 2 とノード 3 の待ち時間の合計を算出したところ 19.23[s] となった。現行のパラメータにおける、待ち時間の合計は 33.9[s] なので、今回算出した最適な f の値を用いることでノード 2, ノード 3 における待ち時間が 44 %削減することができた。

5. 考察

本論文では、介護分野におけるセンサデータ送信システムを効率するために、実際の介護現場での使用を考慮したシステム上のパラメータ算出を目的とした。その目的を達成するために評価の節 4.1 では、提案した待ち行列ネットワークにおいて、評価指標が計測可能なノード 2, ノード 3 を対象として、実際に使用して計測した値と提案モデルを利用して算出した値を比較することで性能評価を行なっ

た。節 4.2 では、提案モデルを利用して最適なアプリ上での送信頻度 f , ファイルサイズ B のパラメータを算出した。

5.1 実証実験によるモデルの性能評価についての考察

性能評価を行なった結果、算出された Tr の値は 31.7[s], 実験によって得られた Tr の値は 28.6[s] となり、提案モデルが 10 %高い値となった。10 %の誤差が出た原因は主に二つあると考えられる。一つは、パラメータの不足である。本研究では、スマートフォンやアプリの構造や通信における規則を基にモデリングした待ち行列モデルに現実で考慮しなければならないパラメータを付加して待ち行列ネットワークモデルを生成した。しかし、現実で運用する上で待ち行列に依存する環境的要素は非常に多いため全てを網羅できていない可能性が高い。例えば、サーバーサイドのメモリ量やクライアント数も対象システムの待ち行列モデルに依存する可能性があるため、検証する必要がある。

今回、5 台のスマートフォンを用いて約 90 分間の実証実験を行なった。スマートフォンの台数や実験時間が十分に長くないため、実験結果から定常的な値を計測できなかったことも誤差の原因として考えられる。図 7 で示すように通信状況を不安定にしているため、スマートフォンからのファイル送信個数は時刻によって大きく変動している。そのため今回の条件では、定常状態に近い値を計測できていない可能性が考えられる。

5.2 最適なパラメータの検証についての考察

本研究の目的である、データ送信システムにおけるパラメータの算出を行なった。今回は実験施設の状況が表 4.1 に従う場合という条件下における最適なパラメータを求めた。また、算出する過程においてもスマートフォンとサーバ間での通信待ち行列を対象としており、サーバ内部における処理システムのトラフィックを考慮していない。この検証で算出した最適な f , B の値を用いることでノード 2, ノード 3 における待ち時間が 44 %削減できる事が分かった。実証実験の結果に誤差が生じたため、最適な f や B の値にも誤差が生じている可能性は高い。図 8,9 から f, B の値によってノード 2, 3 の待ち時間の合計は大きく変動することがわかる。このことから、パラメータチューニングを行うときに f, B のパラメータを最適化することは、非常に効果が高いと考えられる。

6. 結論

本論文では、待ち行列ネットワークを用いた介護センサデータ送信システムをモデリングし効率化する手法を提案した。通信システムにおけるトラフィックを待ち行列ネットワークを用いて、計算する手法は先行研究で行われており、介護行動認識システムへの応用の方法を示した。本論

文での実験および考察において得られた知見を以下に示す。

- 提案システムによって、通信が不安定な状況においてセンサデータがサーバに送信完了するまでの時間を算出することができた。実験において、算出した値と計測値を比較すると 10 % の誤差が生じた。
- 提案システムにおいて、最適なファイル送信頻度 f を算出した結果、現行のパラメータで運用したときより 44 % の待ち時間を短縮できることがわかった。
- パラメータ検証において、ファイルの送信頻度、ファイルサイズはセンサデータ送信における待ち時間の変動に大きく依存することがわかったため、最適化は効果的である。

今後は以下について調査する。

- 待ち行列モデルに加える環境的なパラメータを増やすことで、実機で動かすときと計算値との誤差を無くす。
- 待ち行列ネットワークの範囲をサーバや複数クライアントまで、拡張させることでシステム全体のパラメータ検証を可能なモデルを作る。

参考文献

- [1] 総務省: 第 1 部 特集 IoT・ビッグデータ・AI ネットワークとデータが創造する新たな価値～第 1 節 IoT 時代の新たなサービス (2016).
- [2] 川島幸之助, 塩田茂雄, 河西憲一, 豊泉 洋, 会田雅樹: 待ち行列の基礎と応用, 共立出版 (2014).
- [3] 桐山光弘: 待ち行列がわかる本, 日刊工業新聞社 (1997).
- [4] Han, Y., Han, M., Lee, S., Sarkar, A. J. and Lee, Y.-K.: A Framework for Supervising Lifestyle Diseases Using Long-Term Activity Monitoring, *Open Access Sensors*, pp. 5363–5379 (2012).
- [5] 大北 剛, 井上創造: ダンスの上手い人のマイニング的な分析, インタラクティブ情報アクセスと可視化マイニング研究会.
- [6] Taoa, W., Laia, Z.-H., Leua, M. C. and Yin, Z.: Worker Activity Recognition in Smart Manufacturing Using IMU and sEMG Signals with Convolutional Neural Networks, *46th SME North American Manufacturing Research Conference* 46, pp. 1159–1166 (2018).
- [7] Inoue, S., Hossan, T., Lago, P., Marittha, T. and Marittha, N.: Integrating Activity Recognition and Nursing Care Records: The System, Deployment, and a Verification Study, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, pp. 86–110 (2019).
- [8] 経済産業省委託みずほ情報総研株式会社: 平成 27 年度産業経済研究委託事業 (少子高齢化に伴う経済・社会における課題に関する調査研究) 報告書, (オンライン), 入手先 (https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000410.pdf) (2016).
- [9] 滝根哲哉, 村田正幸: 通信網における待ち行列一理論の応用と課題, オペレーションズ・リサーチ, No. 43, pp. 264–271 (1998).
- [10] 高橋幸雄: 待ち行列研究の変遷, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp. 495–499 (1998).
- [11] 星野智史: 待ち行列ネットワーク理論を用いた AGV 搬送システムの最適設計論, 計測自動制御学会産業論文集, pp. 1–9 (2005).
- [12] 堂柿栄輔, 佐藤一, 五十嵐日出夫: 都心部の街路における駐停車待ち交通の特性とその対応策に関する研究, 土木学会論文集, No. 458, pp. 55–63 (1993).
- [13] 笠原定治: 待ち行列と情報システム性能評価, オペレーションズ・リサーチ, No. 5, pp. 191–197 (2014).
- [14] 海老原義彦, 中村奉夫: LAN 通信システムのポイント・トゥ・ポイント平均応答時間の近似解析, 情報処理学会論文誌, No. 11, pp. 1504–1510 (1989).
- [15] El-Sayed, H., Sankar, S., Prasad, M., Puthal, D., Gupta, A., Mohanty, M. and Lin, C.-T.: Edge of Things: The Big Picture on the Integration of Edge, IoT and the Cloud in a Distributed Computing Environment, *IEEE Access*, pp. 1706–1717 (2018).
- [16] Dang, H. and Wu, H.: Clustering and cluster-based routing protocol for delay-tolerant mobile networks, *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, VOL. 9, NO. 6, pp. 1874–1881 (2010).
- [17] Jian Ni, M. B. R. T. R. S.: Q-CSMA: Queue-Length-Based CSMA/CA Algorithms for Achieving Maximum Throughput and Low Delay in Wireless Networks, *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, VOL. 20, pp. 825–836 (2012).
- [18] Younis, M., Akkaya, K. and Youssef, M.: Handling QoS Traffic in Wireless Sensor Networks, *Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1–10 (2004).
- [19] Dulman, S., Nieberg, T., Wu, J. and Havinga, P.: Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks, *2003 IEEE Wireless Communications and Networking*, pp. 16–20 (2003).
- [20] 紀一誠: 待ち行列ネットワーク, 朝倉書店 (2002).
- [21] 白川 浩: シミュレーションによる待ち行列モデルの最適化について, 日本オペレーションズ・リサーチ学会.