

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04471

研究課題名（和文）IoTシステムの過負荷を抑制するLPWAネットワーク輻輳制御に関する研究

研究課題名（英文）Research on congestion control in LPWA networks to suppress overload of IoT systems.

研究代表者

吉野 秀明（Yoshino, Hideaki）

日本工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：00644816

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）：IoTシステムの輻輳制御に関し主に次の成果を得た(1)LPWAネットワークのランダムアクセスチャネル輻輳を対象に、トラフィック推定に基づく発信規制により輻輳を抑制する適応的制御方式を提案した。スループット特性を理論解析とシミュレーションにより明らかにし、過負荷時でも安定した制御が可能であることを示した。(2)IoTゲートウェイにおいてデータ集約処理時間に上限を設ける集約個数制御方式を提案し、その効果を評価・検証した。(3)TCP in IoT適用時のTCP輻輳制御を対象に、アクセスリンクの低速性からTCP輻輳制御が性能劣化する課題を示し、ネットワークインタフェース層のバッファ設計指針等を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTシステムにおけるセンサ側の情報処理性能の制約の下、LPWA親機側との機能分担を考慮した有効な輻輳制御方式を考案した点、今後のIoTシステムの普及・進展を見据え、広域災害時など緊急時こそ有効に機能する安定した方式を提案した点、低速リンクで多数のセンサを収容するIoT特有のシステム環境から生じるTCP輻輳制御の課題を見出し、ネットワークインタフェース層のバッファ設計指針等を明らかにした点において学術的及び社会的意義が大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：This research aims to establish congestion control schemes to suppress temporal and spatial traffic overload as a basic technology for controlling the future IoT systems. Firstly, we proposed a control scheme to suppress congestion in random access channels caused by the concentration of outgoing signals from IoT devices in LPWA networks by regulating outgoing signals. Throughput characteristics of the proposed congestion control scheme are clarified by theoretical analysis and simulations, the results showed that the proposed scheme can provide stable control even under overload. Secondary, we proposed an aggregation number control that sets an upper limit on the data aggregation time in an IoT gateway and verified its effectiveness. Thirdly, in the TCP in IoT environment, we demonstrated the issue of performance degradation of TCP congestion control due to slow access links and clarified that there is adequate NIC buffer size based on the IoT application requirements.

研究分野：情報学

キーワード：ネットワーク センサ 輻輳制御 トラフィック IoT

### 1. 研究開始当初の背景

モノのインターネット IoT の普及・進展により、自然災害発生時の環境センサや交通渋滞時の車載センサなどからの時空間的に集中したデータ送信により、IoT システムが過負荷となり機能不全に陥る輻輳が今後重要な課題になると想定される。このような輻輳への対策として、第 4 世代携帯電話 LTE(Long Term Evolution)や 5G(5th Generation)などの免許が必要なライセンス系無線ネットワークでは、各種センサからのデータを送信するランダムアクセスチャネルにおける輻輳制御方式が国際標準化機関を中心に提案・評価されている。これに対して免許が不要な IoT 向けのアンライセンス系低消費電力広域無線技術 LPWA(Low Power Wide Area)を対象とした輻輳制御は、パケットのデータサイズが小さく、現状ではトラヒックも少ないことから輻輳が生じにくいと想定されており、十分な検討がなされていない。

既存の電話網やインターネットの輻輳は、人と人あるいは機械と人との間の通信に起因する災害型や企画型などの輻輳が主であり、いずれも安否確認や花火会場での集中など人間の行動に基づく混雑現象として、ある程度の予測や規制が可能であった。これに対し IoT システムでは、輻輳の発生源がモノであり、機械と機械の通信による輻輳が主対象となることから、人間の行動原理に基づく予測や行動規制による制御ができない。このような IoT システムの輻輳は未だ顕在化していないが、その特徴である小サイズ大量データによる輻輳として、スマートフォンからのバックグラウンド制御信号増大による交換機輻輳の事例がある。また、豪雨の際に河川の水位センサや崖の斜面の加速度センサからの観測データが一時に大量に発信され、信号同士の衝突により緊急性を有するアラート情報が適切に届かない事例など、今後 IoT システムが社会に普及・浸透した後を想定した輻輳への対策を事前に検討しておく必要がある。

検討にあたり、IoT システムのデータ発信源であるセンサは、主にバッテリー駆動で低消費電力が要求され、CPU・メモリ等の情報処理性能の制約がある点に留意が必要である。このため、センサ側に高度な制御機能を組み込むことは困難であるとの制約の下、親機(アクセスポイント)側との機能分担を考慮した有効な制御方式が求められる。

### 2. 研究の目的

本研究は、予測や行動規制が困難な IoT システムの過負荷を抑制する LPWA ネットワークの輻輳制御法を明らかにすることで、過負荷時でも安定して通信が可能な IoT システムの実現に資することを目的とする。

### 3. 研究の方法

次の 2 種類の研究手段を活用し、対応する研究課題として、(1)LPWA ネットワークのランダムアクセスチャネルにおける輻輳制御、(2)IoT ゲートウェイにおける時間制約を考慮したデータ集約個数制御、(3)TCP in IoT 適用時の TCP 輻輳制御の 3 課題を中心に研究を遂行した：

#### 【理論解析及び離散事象シミュレータによるスループット・遅延時間の特性評価】

(1)LPWA ネットワークのランダムアクセスチャネルにおける発信規制制御方式を提案し、スループット特性を理論・シミュレーションの両面で評価する。

(2)IoT ゲートウェイにおけるデータ集約個数制御方式を提案し、同解析結果に基づく適応的集約個数制御方式を提案し、シミュレータにより特性評価する。

#### 【ネットワークシミュレータによる TCP 輻輳制御の特性評価】

(3)IoT システムの通信プロトコルのトランスポート層として TCP を適用する「TCP in IoT」を対象に、TCP 輻輳制御の課題と特性を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) LPWA ネットワークのランダムアクセスチャネルにおける発信規制制御

LPWA ネットワーク MAC 層におけるチャネル利用状況を LPWA 親機側で測定し、輻輳時にトラヒック状況に応じてセンサからのパケット送信を規制する適応的発信規制制御方式を提案した。具体的な動作は、図 1 に示すとおり、

MAC 層でパケット衝突による送信不成功の確率を表す不達率を測定する。これに基づき衝突パケットを含むネットワーク負荷を推定し、スループットを最大化する許可率を算出してセンサ側に報知する。センサ側は受信した許可率に基づきパケットを送信する。LPWA のランダムアクセス方式を、ALOHA、CSMA(Carrier Sense Multiple Access)、ICMA(Idle signal Casting Multiple Access)の各方式としてモ

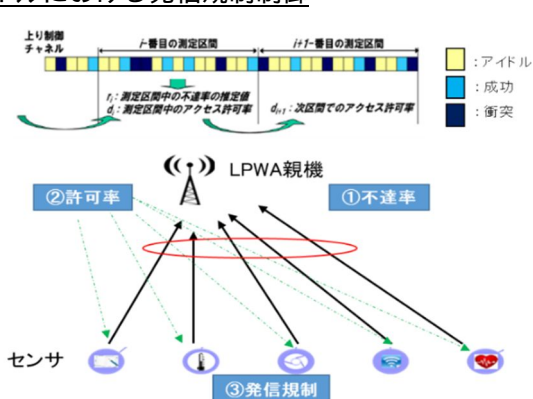


図 1 適応的発信規制制御方式の動作原理

デル化し、上述の提案方式を適用した際のスループット特性を理論解析した。その結果、過負荷時においてもスループットの低下を抑制でき、理論上最大値に近いスループットが実現できることを確認した(図2)。また、実際に MAC 層を slotted ALOHA と slotted ICMA とした際の制御の過渡特性をシミュレーション評価し、適応的発信規制制御方式を適用した時に急激な過負荷が加わる場合においてもスループットが低下することがなく、最大スループットを維持できることを明らかにした。これらの結果より、提案する適応的発信規制制御方式の有効性を確認した。

### (2) IoT ゲートウェイにおけるデータ集約個数制御

ファクトリオートメーションなどの遅延要件の厳しい IoT アプリケーションを実現するためには、IoT ゲートウェイにおける最大処理遅延時間の抑制が必須である。既に提案している適応的データ集約個数制御方式に対して、集約処理時間に上限を設けることにより、遅延時間の最大値を抑制する集約個数制御方式(図3)を提案し、上限時間設定の効果を検証・評価した。その結果、図4に示す通り、一定の効果は認められるものの、データ発生の急変がある Step 型入力の場合には最大遅延時間の変動が大きく制御が安定しないことが判明した。今後はシェイピング制御など他の制御を用いて遅延時間の最大値を抑える、より効果的な制御方式の提案・評価を進める予定である。

また、以下(3)で示す TCP in IoT 環境において集約個数制御を適用した際の TCP 輻輳制御特性を評価したところ、集約数を過度に大きく設定するとタイムアウトが頻発し、集約性能が劣化することが判明した。これを解決する方式として、時間制約付き集約個数制御法を提案し、評価により提案方式がタイムアウト発生を抑制し良好な性能を示すことを明らかにした。

### (3) TCP in IoT 適用時の TCP 輻輳制御

IoT デバイスの処理性能や電源の制約から、IoT システムの通信プロトコルのトランスポート層では、比較的負荷の低い UDP を用いるのが一般的であった。これに対して、IoT デバイスとクラウドサーバが直接エンドエンドで通信を行う環境を提供し、通信の信頼性も担保する TCP in IoT が近年注目され、IETF などでも議論が進められている。本研究では、ネットワークシミュレータ ns-3 を用いて、TCP in IoT 適用時の TCP 輻輳制御の特性を評価し、次のとおり課題と設計指針を明らかにした：

TCP in IoT 環境では、IoT デバイスからの低速アクセスリンクがボトルネックとなることから、ネットワークへ RTT (Round Trip Time) 内に投入できる Inflight パケット数が制限されること、ACK の到着に伴い輻輳ウィンドウ (Congestion Window) サイズが増加し、同サイズと Inflight パケット数に大きな差分が生じること、を明らかにした。この差分によりネットワーク輻輳発生時に TCP によるトラヒック抑制が適切に働かないという課題があることを示した。

上述の結果は、ネットワークインタフェース層のバッファ(以下、二層バッファ)容量を無限大(シミュレーション上で設定できる十分大きな値)として評価した結果であり、上述の差分に相当するパケットが二層バッファに滞留することになる。しかしながら、バッファ容量は有限であり二層バッファでの溢れも考慮する必要があることから、二層バッファ容量が TCP 輻輳制御特性に与える影響を評価した。その結果、二層バッファを小さく設定した場合、スループットは多少低くなるものの、低遅延特性が得られること、一方、二層バッファを大きく設定した場合、遅延性能は劣化するものの、高スループット特性が得られることを示した。これらの結果から、低遅延性が求められるアプリケーションに対しては、二層バッファサイズを 1 に設定するのが望ましく、スループットが求められるアプリケーションに対しては、二層バッファを BDP (Bandwidth Delay Product) 程度に設定するのが望ましい、との設計指針を得た。

以上の成果を踏まえ、今後は IoT システムでの最大遅延時間を抑制する制御方式に関する検討を重点的に進める予定である。

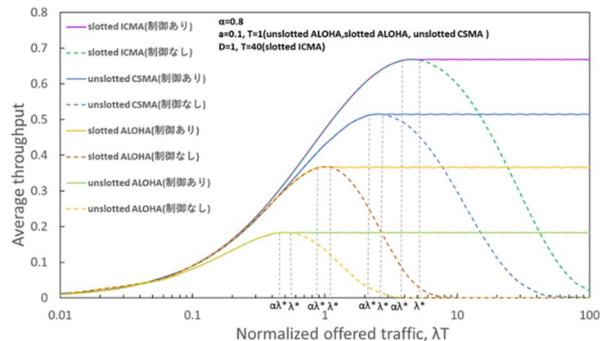


図2 適応的発信規制制御方式の平均スループット特性

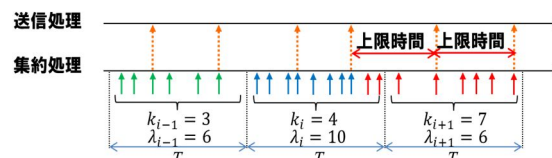


図3 時間上限を設けたデータ集約個数制御

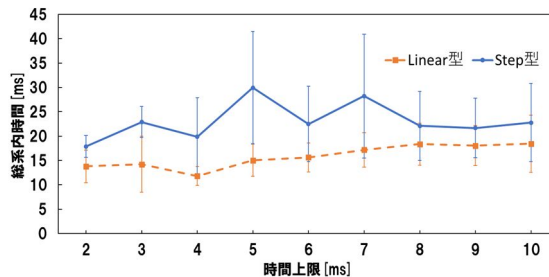


図4 時間上限に対する最大遅延時間特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Mogi Yuto, Ota Kenko, Hiraguri Takefumi, Yoshino Hideaki	4. 巻 11(1)
2. 論文標題 Performance evaluation of priority control scheme for shortest reservation calls under disaster congestion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 9~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021xb10176	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 Akutsu Nobuaki, Shindo Takuya, Hiraguri Takefumi, Yoshino Hideaki, Itoh Nobuhiko	4. 巻 13(3)
2. 論文標題 Streaming quality control based on object-detection accuracy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 76~79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/comex.2023xb10158	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 新井春稀, 伊藤飛雄馬, 伊藤暢彦, 大田健紘, 平栗健史, 山本 幹, 吉野秀明
2. 発表標題 LPWAランダムアクセスチャネルにおける到着の変動が輻輳制御特性に与える影響の評価
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会, B-11-16
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 神崎 惇, 高橋直也, 伊藤暢彦, 吉野秀明, 山本 幹
2. 発表標題 TCP in IoTにおける時間制約を考慮したパケット集約個数制御
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2022-249
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿久津信朗, 平栗健史, 吉野秀明, 伊藤暢彦
2. 発表標題 物体検出精度に基づいた映像品質制御手法の一検討
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神崎 惇, 伊藤暢彦, 吉野秀明, 山本 幹
2. 発表標題 輻輳制御の観点におけるTCP in IoTの一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2022-42
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茂木雄斗, 伊藤暢彦, 大田健紘, 平栗健史, 山本 幹, 吉野秀明
2. 発表標題 LPWAランダムアクセスチャネルのモデル化と輻輳制御方式のスループット評価
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会, B-11-28
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤暢彦, 石川竜也, 阿久津信朗, 平栗健史, 吉野秀明
2. 発表標題 オブジェクト検出のための適応型映像品質制御手法の検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会, B-11-4
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茂木雄斗, 伊藤暢彦, 大田健紘, 平栗健史, 山本幹, 吉野秀明
2. 発表標題 IoT向け無線通信ネットワークの輻輳制御方式に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂木雄斗, 大田健紘, 平栗健史, 吉野秀明
2. 発表標題 災害輻輳に対する最短通話優先制御方式の改良と特性評価
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-6
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 茂木雄斗, 大田健紘, 平栗健史, 吉野秀明
2. 発表標題 災害型輻輳に対する最短通話予約優先制御方式の特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, CQ2020-112
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 茂木雄斗, 荻野翔平, 桑原優介, 大田健紘, 平栗健史, 山本 幹, 吉野秀明
2. 発表標題 IoTシステムのランダムアクセスチャネルにおける輻輳制御方式のシミュレーション評価
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会, B-11-4
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神崎 惇, 伊藤 暢彦, 吉野 秀明, 山本 幹
2. 発表標題 TCP in IoT における二層バッファが輻輳制御に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS-2023-139
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂本 篤弘, 松尾 勇輝, 伊藤 暢彦, 大田 健紘, 平栗 健史, 山本 幹, 吉野 秀明
2. 発表標題 集約時間に上限を設けた適応的データ集約個数制御方式の評価
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 直也, 伊藤 暢彦, 吉野 秀明, 山本 幹
2. 発表標題 TCP in IoT でのパケット集約制御におけるトランスポート層の影響
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-14
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobuaki Akutsu , Takuya Shindo , Hideaki Yoshino , Nobuhiko Itoh
2. 発表標題 Streaming quality control using deep reinforcement learning for object-detection
3. 学会等名 2024 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, NCSP'24 (国際学会)
4. 発表年 2024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
研究分担者	山本 幹 (Yamamoto Miki)  (30210561)	関西大学・システム理工学部・教授  (34416)	
研究分担者	伊藤 暢彦 (Itoh Nobuhiko)  (40706032)	日本工業大学・先進工学部・准教授  (32407)	
研究分担者	平栗 健史 (Hiraguri Takefumi)  (90582817)	日本工業大学・基幹工学部・教授  (32407)	
研究分担者	大田 健紘 (Ota Kenko)  (50511911)	日本工業大学・基幹工学部・助教  (32407)	

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
---------	---------