

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2017～2019

課題番号：17KT0080

研究課題名（和文）セキュアIoTサービスに向けた人と機械の信頼関係構築フレームワーク

研究課題名（英文）A Framework for Building Trust between People and Machines for Secure IoT Services

研究代表者

菅沼 拓夫（Suganuma, Takuo）

東北大学・サイバーサイエンスセンター・教授

研究者番号：70292290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、セキュアなIoTサービスの実現に向けて、人と機械の信頼関係を構築し、強化するフレームワークを研究開発した。具体的には、プライバシー情報の取得・可視化、および、プライバシー適正化のためのインタラクションにより、IoT機器がどのような情報を情報流として流しているかの状況を、人間・機械協調系として処理することで人の安心感の増幅を試みた。また、これらの技術の有効性を実環境で確認するため、コミュニケーションロボットへの応用とその実験と評価を行った。これにより、実証実験を通じて有用性、実現可能性、効果等について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

システムの信頼性に関する研究分野においては、ユーザの観点でその安全性に対する感覚的な安心感・信頼感の向上については研究が進んでいない。本研究では工学的なアプローチによってプライバシー情報、機微情報の開示度を定量化・可視化し、不確実・不安定な人の感情をパラメータとして処理可能とする「Human-in-the-loop」の考え方の導入によってユーザの感覚に合った情報開示度を人・機械協調系で決定する点が学術的な特徴である。これにより人と機械の間の信頼性を構築できれば、人とロボットの共生に関わる課題に対してブレークスルーとなる可能性があり、将来の情報社会に対して大きなインパクトを与えることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we establish and strengthen the trust relationship between humans and machines to realize secure IoT services. The framework was researched and developed. Concretely, we can obtain and visualize the privacy information and the Interactions allow us to see what information flowing through the IoT devices as information flow. We attempted to increase the sense of security by treating the system as a human-machine cooperative system. In addition, in order to confirm the effectiveness of these technologies in real-world environments, we have applied them to communication robots and conducted experiments and evaluations. The usefulness, feasibility, and effect of the proposal were clarified through the demonstration experiments.

研究分野：情報通信システム

キーワード：IoT ロボット 信頼関係 プライバシ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

申請者らは、IoT 機器が生成するデータストリームである「情報流」活用の課題の解決に向け、研究分担者の安本を中心に、世界に先駆けて情報流プロジェクトを結成し、2014 年から活動を続けている[1-3]。また研究代表者の菅沼は、CPS の研究潮流に先駆けて 2003 年より現実空間とサイバー空間の共生に関する研究開発を推進しており[4]、近年では総務省 SCOPE 国際連携プロジェクト[5]等で、IoT におけるプライバシー情報の流通に関する研究を進めている。研究分担者の加藤は、ネットワークロボットと人とのインタラクションの研究を推進している[6]。以上の研究活動を通し、申請者らは、IoT の真の普及のためには、情報提供者である人と情報の管理・配布を行う機械の間で信頼関係を構築できる仕組みが最も重要との認識を共有してきた。

IoT 機器からは、プライバシー情報として、位置情報に加え、画像・音声情報、生体情報、テキスト情報等がネット上に流通する可能性がある。一般のユーザにとって、提供した情報の利用のされ方、流通範囲が不明なため、情報の提供には抵抗があり、IoT データ流通の阻害要因となっている。さらに、人が IoT 機器とインタラクションする際に、何がセンシングされているのかわからないことも問題である。一方で、人と人のインタラクションにおいては、人は意外にも、プライバシー情報や機微情報をあっさり公開してしまうことも多い。これは、人と人のインタラクションでは、信頼関係がすでに構築されていて情報の秘匿が守られる安心感があり、また、人は聞いたことをすぐに忘れるという点が考慮されるからである。以上のことから、これまでの申請者らの研究成果を踏まえ、IoT データ(情報流)の広い流通・利活用のためには、人と機械(IoT 機器)の間の信頼関係構築が不可欠であるとの着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、ロボット、IoT 機器、新世代ネットワークを高度に融合することで IoT データ(情報流)の安全・安心かつ幅広い流通・利活用を実現する情報流基盤の構築を目指す。特に情報流の発生現周辺においては、人と、その人の生活空間に入り込んで近接する IoT 機器との関係性が良好でないと、サービス利用の安心感・信頼感が損なわれ、十分なサービスを楽しむことができない。そこで本研究では、セキュアな IoT サービスの実現に向けて、人と機械の信頼関係を構築し強化するフレームワークを研究開発する。具体的には、A. プライバシー情報の取得・可視化、および、B. プライバシー適正化のためのインタラクションにより、IoT 機器がどのような情報を情報流として流しているかの状況を人間・機械協調系として処理することで、人の安心感の増幅を試みる。また、これらの技術の有効性を実環境で確認するため、C. コミュニケーションロボットへの応用と、D. 実験と評価によって、実証実験を通じて有用性、実現可能性、効果等について明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究は、H29-31 年度の 3 年間で実施した。研究目的の項で述べた通り、人と機械の信頼関係を構築するための技術的課題として、A. プライバシー情報の取得・可視化、B. プライバシー適正化のためのインタラクションを解決する。また、これらの技術の有効性を実世界の中で確認するため、C. コミュニケーションロボットへの応用と D. 実験と評価を行う。それぞれの詳細について以下に示す。

#### 研究項目 A. プライバシー情報の取得・可視化

研究項目 A では、以下の 3 つのサブ項目を設定する。

A1) プライバシー情報のセンシング・抽出、A2) プライバシー程度の点数化、A3) プライバシー情報の可視化:

## 研究項目 B. プライバシ適正化のためのインタラクション

研究項目 B では、以下の 3 つのサブ項目を設定する。

B1) プライバシ適正化モデル, B2) プライバシ適正化インタラクション, B3) 適正化のインタフェース

## 研究項目 C. コミュニケーションロボットへの応用

研究項目 C では、以下の 3 つのサブ項目を設定する。

C1) コミュニケーションロボットの設計, C2) インタフェースの組み込み, C3) アプリケーションサービスの開発:

## 研究項目 D. 実験と評価

研究項目 D では、以下の 3 つのサブ項目を設定する。

D1) 実験環境の構築, D2) 評価シナリオの設計, D3) スマートホームでの評価実験

## 4. 研究成果

### (1) 平成 29 年度

#### 研究項目 (A) プライバシ情報の取得・可視化

主に (A2) プライバシ程度の点数化, (A3) プライバシ情報の可視化を実施した。具体的には、得られたプライバシ情報の開示度スコアリングを行う手法を考案した。また、これらの結果に基づき、キーワードの出現頻度の可視化法やレーダーチャート等を参考に、動的に複数のプライバシタイプとその程度が可視化できる方法を考案した。

#### 研究項目 (B) プライバシ適正化のためのインタラクション

(B1) プライバシ適正化モデル, (B2) プライバシ適正化インタラクション, (B3) 適正化のインタフェースを実施した。具体的には、機械に把握されているプライバシ把握情報を適正化するインタラクション法を考案した。その際、ユーザをプロファイリングし、タイプごとに適正化モデルを構築した。次に、構築したモデルをもとに、どのようなインタラクションを行うことで効率良くプライバシ情報の適正化（公開範囲の調整）が可能かを検討し、インタラクションルールとして作成した。さらに、抽出したインタラクションルールをもとに、インタラクションのためのインタフェースを作成した。

#### 研究項目 (C) コミュニケーションロボットへの応用

(C1) コミュニケーションロボットの設計, (C2) インタフェースの組み込み, (C3) アプリケーションサービスの開発を実施した。具体的には、プライバシ情報の取得と可視化、およびプライバシ適正化のためのインタラクションを対話的に行うためのロボット機能を設計した。さらに、環境側に設置された多種多様な IoT 機器とロボットを組み合わせ、アプリケーションサービスを設計した。

#### 研究項目 (D) 実験と評価

(D1) 実験環境の構築, (D2) 評価シナリオの設計, (D3) スマートホームでの予備実験を実施し、研究成果の評価・検証のための準備を行った。

#### 平成 29 年度の成果まとめ

初年度の平成 29 年度は、全体的に概ね順調に、当初計画通り研究開発が進捗した。特に、(A2) プライバシ程度の点数化, (B1) プライバシ適正化モデル, および (B2) プライバシ適正化インタラクションにおいては、インターネットの各種サービスを利用する際の個人情報の開示度設定に際し、ユーザが持つ開示度の好みだけでなく当該ユーザの情報リテラシも考慮した適切な設定を推薦する手法について検討し、シミュレーション実験によりその有効性を検証した。この研究

成果を国内論文誌に投稿し、予定を上回る進捗状況であった。また、本提案における人と機械の信頼関係構築のための基本的な考え方を、「利用者指向性」を特徴とした「やわらかいエッジコンピューティング(Flexible Edge Computing: FLEC)」の概念としてまとめ、その論文が IEEE Network (IF:7.230)に掲載された。この論文は 2018 年 2 月の IEEE Network の Popular Articles の第 5 位にランキングされている。

## (2) 平成 30 年度

### 研究項目(A) プライバシ情報の取得・可視化

(A3)の可視化に取り組んだ。本研究では、人が機械とインタラクションする際にどれだけのプライバシー漏洩のリスクがあるのかをコミュニケーションを妨げることなく直感的・容易に把握できるようにする必要がある。また、プライバシーの内容そのものが、他の人にわからないようにする配慮も必要である。これらの点を考慮したプライバシーの可視化を、プライバシー点数化技術を参考に設計・実装した。

### 研究項目(B) プライバシ適正化のためのインタラクション

(B1)-(B3)に取り組み、プライバシー適正化モデル、および、適正化のインタラクション、それに基づいたインタフェースを検討した。プライバシー適正化モデルに関しては、k-匿名性に基づき適正なプライバシーレベルを評価する方法と、新規のプライバシーデータに対し、適正レベルを推定する方法を設計した。適正化のインタラクションについては、画面表示により指示する方法、音声により指示する方法、その他(ジェスチャや表情により指示する方法等)、それらの組み合わせについて、それぞれのシチュエーションで最も適したインタラクションがどうなるのかについて検討した。また、これらのインタラクションに適したインタフェースとして、音声および深度カメラを用いたシステムの検討を行った。

### 研究項目(C) コミュニケーションロボットへの応用

(C1)のロボットの設計を終え、(C2)ロボットへのインタフェースの組み込み、(C3)アプリケーションソフトウェアの設計と実装に着手した。アプリケーションとしては、家庭において生活支援を行うロボットを想定する。ロボットが入手したプライバシー情報のうち、家族内で共有可能、友人や近所の住人と共有可能、誰にでも共有可能といった公開可能範囲を、提案するインタフェースによって、容易かつ直感的に適正化可能かどうかを検討した。

### 研究項目(D) 実験と評価

前年度から継続して、研究成果の評価・検証のための準備を行った。

### 平成 30 年度の成果まとめ

(B2)プライバシー適正化インタラクションにおいては、深度カメラを用いた適正化インタラクションに向けた取り組みの一部として、ウェアラブル深度カメラを使った生活行動推定に関する研究を進め、ウェアラブルコンピュータに関するトップ会議である 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC2018)に採択されている。また、IEEE PerCom Workshop 2019 や、The 33rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2019)などの有名国際会議にも採録されている。以上から、部分的には計画以上に進展しており、全体としては概ね順調に研究が進展したといえる。

## (3) 令和元年度

### 研究項目(A) プライバシ情報の取得・可視化

### 研究項目(B) プライバシ適正化のためのインタラクション

人とシステムとのインタラクションに加えて、システム内における人の代理となるエージェントと、企業などのデータ利用側のエージェントとの間でのインタラクションについての高度化を検討した。具体的には、これらのエージェント間において、その交渉を監視する第三者エージェントを導入し、その仲介によって行われる自動交渉による便益決定手法を提案し、実験の結果、提案によって社会的に効用の高い自動交渉が実現可能であることを確認した。

#### 研究項目(C)コミュニケーションロボットへの応用

スマートホームでの利用を前提とした具体的なロボットサービスシナリオを想定し、ロボットアプリケーションの設計・実装を行った。ここではまず、一般家庭における日常生活の場で取得可能な情報(非侵襲型のセンサーで取得可能なデータ)の中で、それがプライバシー情報になり得る情報を抽出し、情報間の関係を階層的に分類した。そして、この分類結果とユーザ属性に基づき、プライバシー情報の開示レベルをユーザとのインタラクションにより動的に設定可能な機構を設計した。その後、具体的なロボットサービスシナリオ(カレンダーと連携したスケジュールリングサービス、顔画像からの感情認識を利用した音楽推薦サービス)を想定することで、フレームワークの有効性を検証した。具体的なロボットアプリケーションとしては、ユーザの顔検出および声掛けに応じて挨拶を返すロボットサービスを設計し、ロボットを介したプライバシー情報の入手機能として実ロボットに実装した。この結果を、国内外に点在するロボット約30台を連携し、Web経由でその稼働状況を確認できる「ロボットMap」に関するデモンストレーションの一部として、2019国際ロボット展に出展した。

#### 研究項目(D)実験と評価

プライバシー漏洩のリスクを最小化し、サービスを通じて得られる利用者の利益を最大化することを目的として、各種センサーを備えた複数のスマートホーム、エッジコンピューティングサーバー、クラウドサーバーからなるスマートホーム群を対象に、プライバシー漏洩リスクとサービスから得られる利益のトレードオフを考慮することが可能なデータ管理システムを開発した。開発した手法では、ユーザのプライバシーを保護しつつ、サービスのメリット(利益)を維持するために、(i)アップロードするデータの種類とアップロード頻度の選択肢の提供、(ii)時間帯ごとのリスクと利益の評価、(iii)リスクと利益のトレードオフを考慮した各時間帯における最適な選択の決定を行う。生活行動のオープンデータセットCASASをもとに再現した数10軒分の時系列センサーデータ・行動に提案手法を適用した結果、提案手法はクラウドのみを使用する既存手法に比べ、より低いリスクで高い利益が得られることがわかった。

#### 参考文献

- [1]情報流プロジェクト: [www.infoflow.org](http://www.infoflow.org),
- [2] International Workshop on Information Flow of Things: <https://ubis13.naist.jp/ifot2016/>,
- [3] K. Yasumoto, et al., "Survey of Real-time Processing Technologies of IoT Data Streams," JIP 24(2): pp.195-202, 2016,
- [4]菅沼拓夫他, "Symbiotic Computing - ポスト・ユビキタス情報環境へ向けて - ", 情報処理学会誌, 47(8), pp.811-816, 2006,
- [5] 総務省 SCOPE 国際連携「プライバシーに配慮した情報提供を可能にする高度知識集約プラットフォームの研究開発」(平成26~28年度, 1.7億円),
- [6] Y. Kato, "A Remote Navigation System for a Simple Tele-presence Robot with Virtual Reality," Proc. IEEE/RSJ IROS2015, pp.4542-4529, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Philipp Voigt, Matthias Budde, Erik Pescara, Manato Fujimoto, Keiichi Yasumoto, Michael Beigl	4. 巻 なし
2. 論文標題 Feasibility of human activity recognition using wearable depth cameras	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC'18)	6. 最初と最後の頁 92-95
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Naoki Yoneoka, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto	4. 巻 なし
2. 論文標題 Detecting Surrounding Users by Reverberation Analysis with a Smart Speaker and Microphone Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE PerCom Workshops 2019 (2019 International Workshop on Pervasive Flow of Things, PerFoT2019)	6. 最初と最後の頁 523-528
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wataru Sasaki, Masashi Fujiwara, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto	4. 巻 なし
2. 論文標題 Predicting Occurrence Time of Daily Living Activities Through Time Series Analysis of Smart Home Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE PerCom Workshops 2019 (3rd International Workshop on Pervasive Smart Living Spaces, PerLS '19)	6. 最初と最後の頁 233-238
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Research Dawadi, Teruhiro Mizumoto, Keiichi Yasumoto	4. 巻 なし
2. 論文標題 MutualMonitor: A Tool for Elderly People to Anonymously Monitor Each Other	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2018)	6. 最初と最後の頁 1-6
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fumi Ito, Eri Ozawa and Yuka Kato	4. 巻 なし
2. 論文標題 Design of Robot Service Functions for a Framework Establishing Human-Machine Trust	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 33rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2019)	6. 最初と最後の頁 1193-1204
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伊東風弥, 加藤由花	4. 巻 なし
2. 論文標題 人と機械の信頼関係構築フレームワークでの利用を前提としたロボットサービス機能の設計	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02018) シンポジウム予稿集	6. 最初と最後の頁 981-986
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 Hayato Abe, Makoto Miura, Toru Abe, and Takuo Suganuma	4. 巻 なし
2. 論文標題 A Telexistence System Using Remote Control Robot and Omnidirectional Camera with QoE Control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018)	6. 最初と最後の頁 797-799
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 菅沼拓夫, 安本慶一, 加藤由花	4. 巻 Vol. 2018-DPS-175, No. 38
2. 論文標題 セキュアIoTサービスに向けた人と機械の信頼関係構築フレームワークの基本構想	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-7
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 Hayato Abe, Makoto Miura, Toru Abe, and Takuo Suganuma	4. 巻 なし
2. 論文標題 Implementation of Telexistence System Using Remote Control Robot and Omnidirectional Camera	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 平成30年度 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 2F19
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 三浦誠, 阿部亨, 菅沼拓夫	4. 巻 Vol.2018-CVIM-214, No. 1
2. 論文標題 人物の骨格と画像中のエッジを用いた所持品領域検出に関する一検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-8
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 塚本竜広, 阿部亨, 菅沼拓夫	4. 巻 なし
2. 論文標題 手の周辺領域の状態に基づく人物と物体のインタラクション検出手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第21回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2018) 予稿集	6. 最初と最後の頁 PS3-12
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 佐々木涉, 藤原聖司, 諏訪博彦, 藤本まなと, 荒川豊, 木村亜紀, 三木智子, 安本慶一	4. 巻 なし
2. 論文標題 ECHONET Lite対応家電と人感センサの時系列データ分析による宅内行動認識	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Workshop of Social System and Information Technology (WSSIT2018)	6. 最初と最後の頁 1-8
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 Takuo Suganuma, Takuma Oide, Shinji Kitagami, Kenji Sugawara, Norio Shiratori	4. 巻 Vol.32, Issue 1
2. 論文標題 Multiagent based Flexible Edge Computing Architecture for IoT	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Network	6. 最初と最後の頁 16-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MNET.2018.1700201	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 萱場啓太, 生出拓馬, 阿部亨, 菅沼拓夫	4. 巻 Vol.117, No.205, IN2017-23
2. 論文標題 個人の好みの明確さに基づくパーソナルデータ流通制御支援手法の提案	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
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 Takuma Oide, Toru Abe and Takuo Suganuma	4. 巻 Vol. 18, Issue 3
2. 論文標題 Infrastructure-Less Communication Platform for Off-The-Shelf Android Smartphones	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18030776	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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	安本 慶一  (Yasumoto Keiichi)  (40273396)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授    (14603)	

