# 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

伊東 風弥[1]　加藤 由花[1]

**概要**：ロボット，IoT 機器，新世代ネットワークを高度に融合し，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構築に対する期待が高まっている．このような背景の下，我々は現在，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の研究開発を進めている．本稿では，このフレームワークでの利用を前提としたロボットアプリケーションの設計結果を報告する．本アプリケーションは，機械に対するプライバシ情報の開示度をユーザ自らが調整できる機能を有する点に特徴がある．ここでは，設計したロボットアプリケーションの利用シナリオを提示することにより，フレームワーク機能の実現可能性を検証する．

## 1. はじめに

ロボット，IoT 機器，新世代ネットワークを高度に融合し，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構築に対する期待が高まっている [1]．これを実現するには，情報流の発生源周辺において，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あり，サービス利用の安心感・信頼感が醸成されることが必須である．そのため，我々は現在，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の研究開発を進めている [2]．フレームワークのイメージを **図 1** に示す．

ここでは，日常生活の場でセンサー等から得られるプライバシ情報をフレームワーク側で取得・可視化し，ユーザにその把握レベルを提示する．さらに，機械に把握されているプライバシ情報を，ユーザのプロファイルに基づくタイプごとに分類し，ユーザとのインタラクションにより開示度を適正化する．現在までに，ユーザの情報リテラシや好みに応じた適切な設定を推薦することで，プライバシ適正化を効果的に支援する手法が提案されてきた [3]．ここでは，シミュレーションによる評価実験が行われているが，実環境におけるユーザのパーソナルデータ流通制御は非常に複雑な要素によりなされるものであるため，実環境における実証実験によるフレームワークの検証が必須であるという課題が残った．

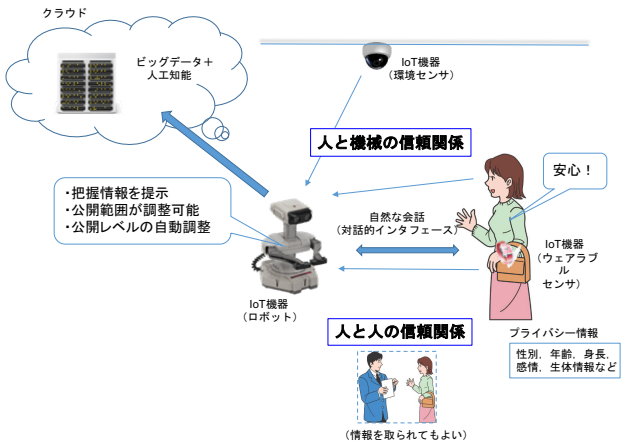


**図 1**　人と機械の信頼関係構築フレームワークの概要．

このような背景の下，本稿では，身体性を持ったコミュニケーションロボットを利用し，多種多様な IoT 機器とロボットを組み合わせたアプリケーションサービス（ロボットアプリケーション）を設計することで，フレームワークの検証を行うことを目指す．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で，それがプライバシ情報になり得る情報を抽出する．次に，探索範囲の指定によりプライバシ情報の開示度を調整できる機能を有するロボットアプリケーションを設計する．その後，設計したアプリケーションの利用シナリオを提示することにより，プライバシ情報の開示度，適正化機能の実現可能性について検証を行う．本稿の貢献は以下の 2 点である．

- フレームワーク検証のためのロボットアプリケーションを設計する
- 利用シナリオによりフレームワーク機能の実現可能性を検証する

[1] 東京女子大学 大学院理学研究科

以下，2 章において，本稿で考察対象とする「人と機械の信頼関係構築フレームワーク」の概要について説明した後，3 章で対象となるプライバシ情報の分類結果を示す．その後，4 章でアプリケーションの設計結果について説明した後，5 章で利用シナリオを用いた設計結果の検証を行う．最後に 6 章で本稿をまとめる．

## 2. 人と機械の信頼関係構築フレームワーク

本稿で考察対象とする「人と機械の信頼関係構築フレームワーク」では，人と機械（IoT 機器）の信頼関係を構築するために，以下の 2 項目の課題を設定し，その解決を目指したフレームワーク機能の設計を行っている [2].

- IoT 機器がどれだけのプライバシ情報を把握しているかをいかに自然な形で提示するか
- 既把握のプライバシ情報のうち公開しても良い範囲をいかに自然なインタラクションで調整するか

前者を解決するためには，プライバシ情報を取得する方法，プライバシの種類や度合いを計算する方法，計算結果をユーザに自然な形で提示する方法を開発する必要がある．後者を解決するためには，人と人の会話のように，IoT 機器と会話しながら，指定したプライバシ情報を公開しない（または，公開する）ように設定できる対話的インタフェースを実現する必要がある．さらには，過去のインタラクション履歴等を踏まえて，空気を読み，ユーザが何も言わなくても，プライバシ情報の公開レベルを自動的に設定する機能も求められる．

これらの各課題に対応し，フレームワークは，大きく分けて 2 つの機能を有するものとして構成される．一つは，プライバシ情報の取得・可視化機能であり，もう一つは，プライバシ適正化のためのインタラクション機能である．以下，それぞれについて説明する．

### 2.1 プライバシ情報の取得・可視化

本機能は，プライバシ情報として，マイク・カメラ等から得られる日常生活の映像・音声や，ウェラブルセンサから取得される生体情報，SNS に投稿されるテキスト情報を対象とし，そこからプライバシにかかわる情報を抽出して点数化，可視化するものである．これまで，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（PD）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を考慮した適切な設定を推薦する手法の検討等が行われている [3]．ここでは，設定履歴を分析し，類似のサービス事業者に対して類似の設定を安定的に実施できているユーザに関して，設定の一貫性が高いと判定する．その後，設定の一貫性を他のユーザと相対的に比較し，それに基づき情報リテラシの程度を推定する．次に，情報リテラシの程度に応じて適切な設定を推薦する．既存手法 [4][5] との比較により，手法の有効性も検証されている．

これにより，設定の半自動化が実現するが，PD の公開/非公開といった微妙な判断をそのときの事情に合わせて確実に行うためには，ユーザとの密なインタラクションによる適応的調整が不可欠である．そのため，可視化機能と合わせて，次節で述べるプライバシ適正化のためのインタラクション技術を組み合わせることにより，この調整を実現する．

### 2.2 プライバシ適正化のためのインタラクション

本機能は，機械に把握されているプライバシ情報を，ユーザのプロファイルに基づくタイプごとに分類し，適正化するインタラクション，および適正化のためのユーザインタフェースを実現する機能である．この機能により．ユーザのプライバシに関する意図がシステムに反映されるようになる．具体的には，以下の 3 つの事項をユーザが把握した上で，各プライバシ情報により生じるリスクと，情報を提供することで受けることができるサービスの利益の間のトレードオフを考慮しながら，利益の最大化もしくはリスクの最小化を行うように，情報の削除やアクセス権の制御などを施すことを目指すものである．

- どのようなプライバシ情報が IoT 機器によって取得されたのか，またそのリスクは？
- 取得されたプライバシ情報に誰がアクセスできるのか，またそのリスクは？
- 取得されたプライバシ情報はどのように悪用されうるのか，またそのリスクは？

なお，プライバシ情報のリスク度合いは個々人によって異なってくると考えられるため，これまで，以下の手順によりリスク度合いの算出法をパーソナライズする方法が検討されている [2]．まず，IoT 機器 $d$ が取得する情報種類の集合 $I_d$ について，リスク度合い算出関数 $\forall i \in I_d, R(d, i, C_i)$ を定義する．ここで，$C_i$ は情報 $i$ に対するリスク度合いをパーソナライズする重み係数の集合である．次に，インタラクションによりユーザがリスク度合いを変更した IoT 機器を $d^*$，情報 $i$ に対する変更後のリスク度合いを $R^*(d, i)$ とし，$\forall i \in I_d, R(d, i, C_i^*) = R^*(d, i)$ となるよう，重み係数集合 $C_i$ を $C_i^*$ に更新する．

## 3. プライバシ情報の分類

提案するフレームワークを検証するために，本研究では，身体性を持ったコミュニケーションロボットを利用し，上記の機能（プライバシ情報の取得・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）を対話的に実行可能なロボット機能を設計する．これは，機械と人間のインタラクションはマルチモーダルに行われ，これをユーザにとって自然な形で実現するためには，インタフェースとして多種多様なセンサとアクチュエータを搭載するコミュニ

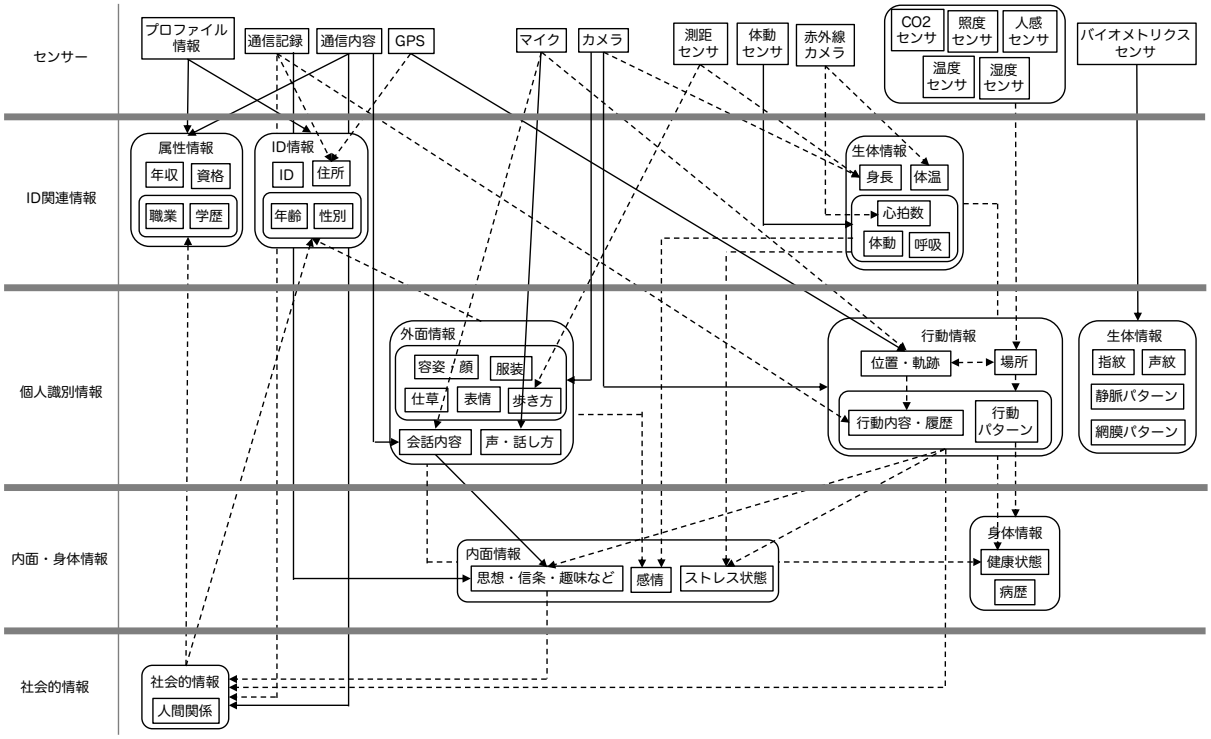


**図 2** プライバシ情報となり得る情報の分類結果（文献 [2] より引用）．最上位はセンサで直接計測されるデータである．ある情報から直接類推可能な情報は実線の矢印で，間接的に類推可能（データ統合，分析等により類推可能）な情報は破線の矢印で結ばれている．

ケーションロボットが適していると考えられるためである．

ロボットアプリケーションの設計にあたっては，まず，一般家庭における日常生活の場で取得可能な情報（非侵襲型のセンサで取得できるものを対象にする）で，それがプライバシ情報になり得る情報の抽出を行う．本章ではその概要を説明する．なお，ここでは文献 [2] において抽出した結果を利用する．これまでも，例えば文献 [6] において，個人情報ないしはプライバシ情報を ID 情報，ID 関連情報，個人識別情報，内面情報に分類し，各情報に対応する情報処理技術との関係を示した例などが存在する．本稿で利用する分類では，これらの情報に感情や社会的情報を付加した上で，ある情報から直接，または間接的に類推可能な情報を有向枝で結ぶことで，情報間の関係を明示した分類を行っている．分類結果を **図 2** に示す．これらの情報は階層的に分類され，各情報間は，直接類推可能な場合は実線で，間接的に類推可能な場合は点線で結ばれている．

ここでは，プライバシ情報は大きく 5 つの階層（センサーデータ，ID 関連情報，個人識別情報，内面・身体情報，社会的情報）に分類され，各階層の中にいくつかのデータ種別が，各データ種別の中にいくつかのプライバシ情報が含まれる構成が取られている．ある情報から推定可能な情報は，プライバシ情報単体の場合もあれば，あるデータ種別に含まれる情報を包括的に推定可能な場合もある．また，複数の情報を組み合わせることにより，ある情報が推定可能な場合もある．例えば，マイクによる音響センシングの結果からは，声・話し方等の外面情報が直接取得可能であるが，音の発生源までの距離を分析することで移動軌跡が推定されるならば，間接的に行動情報の取得も可能であることになる．また，行動内容や行動パターンなどの行動情報は，他の情報と統合することで，人間関係等の社会的情報を類推可能であり，その結果，職業等，個人の属性情報が類推される可能性が出てくる．

このように，この分類結果を用いると，階層間の矢印をたどることで取得可能なプライバシ情報を知ることができる．また，グラフ探索の範囲を指定することにより，機械に提供するプライバシ情報の範囲を指定することができるようになる．このことを利用し，プライバシ情報の適正化において，プライバシ情報ごと，データ種別ごと，階層ごとに情報の公開レベルを設定することが可能になる．

## 4. ロボットアプリケーションの設計

本稿では，前節で抽出したプライバシ情報を収集し，探索範囲の指定によりプライバシ情報の開示度を調整できる機能を有するロボットアプリケーションを設計する．

### 4.1 システムの構成

2 つの機能を実現するために設計したシステムの構成を **図 3** に示す．システムは，ユーザと機械のインタフェースとなる IoT 機器（コミュニケーションロボット，タブレット PC，環境に配備される IoT 機器から成る），IoT

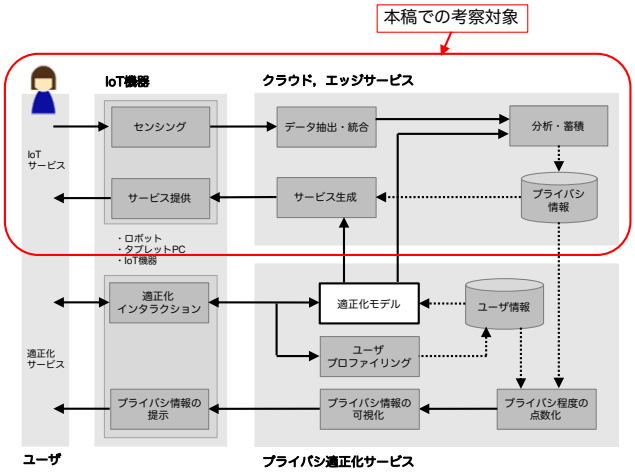


**図 3** フレームワークの構成．フレームワークは，ユーザと機械のインタフェースとなる IoT 機器，IoT サービスを提供するクラウド・エッジサービス，提供可能なプライバシ情報の設定を自然なインタラクションにより実現するためのプライバシ適正化サービスの 3 つの部分から成る．

サービスをユーザに提供するためのクラウド・エッジサービス，提供可能なプライバシ情報の設定を自然なインタラクションにより実現するためのプライバシ適正化サービスの 3 つの部分から成る．各部分に配備される機能モジュールを組み合わせることにより，ユーザへのサービス提供に加え，プライバシ情報の取得・可視化，およびインタラクションの各機能を実現する．なお，本稿の目的は，フレームワーク検証のためのロボットアプリケーションの設計であるため，図 3 における赤枠で囲った部分を対象とし，適正化インタラクションや適正化モデルの実現方法については考察対象外とする．

各機能モジュール間での処理の流れは **図 4** に示すとおりである．まず，ユーザが IoT サービスを利用する場合，IoT 機器やロボットによるセンシング結果がプライバシ適正化モデルに従って分析され，プライバシ情報として蓄積されるとともに，IoT サービスが提供される（図 4 の上図）．このとき，プライバシ情報は，適正化モデルに従い，ユーザにとっての適切な開示度に基づき利用・蓄積される．蓄積されたプライバシ情報は，ユーザ特性に応じて点数化・可視化がなされ，その結果がユーザに提示される（図 4 の中図）．このときユーザは，機械との自然なインタラクションにより適正化モデルを更新する．提案フレームワークは，このインタラクションの過程でユーザ特性をプロファイリングし，この結果を適正化モデルに反映する（図 4 の下図）．

本稿では，適正化インタラクションの結果更新された適正化モデルが存在しているという前提の下に，ロボットアプリケーション（図 4 の上図の流れに従ったサービスを提供するアプリケーション）を設計する．なお，3 章における分類結果は，プライバシ情報の提示，および適正化モデルの部分に組込み，これらのプライバシ情報を，家庭内で共有可能，友人や近所の住人と共有可能，誰でも共有可能というように，公開可能範囲を容易かつ直感的に適正化できるようにする．

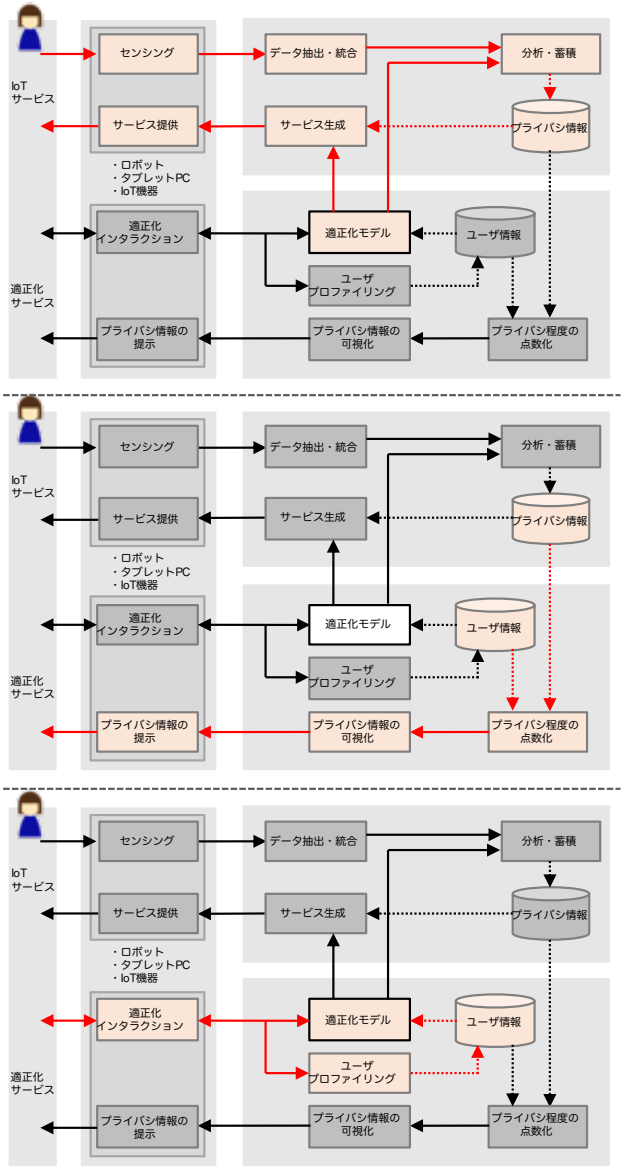


**図 4** 各モジュール間での処理の流れ．IoT サービス利用時の流れを上図に，プライバシ情報の可視化の流れを中図に，適正化インタラクションの流れを下図に示す．

## 4.2 サービスの概要

フレームワーク検証のための IoT サービスの一例として，家庭内に設置されたロボットと人が音声対話を行うアプリケーションを考える．利用するコミュニケーションロボットとしては，テーブルトップサイズの普及型ロボットプラットフォームを用いることとする．ロボットの機能は以下のとおりである．

- 人間との音声対話機能
- カメラ・マイクでの環境情報の取得

- LED ライトによる感情表現
- 胴体 1 軸，腕 2 軸× 2，首 3 軸の合計 8 自由度（移動機能は有しない）
- クラウドサーバや外部機器との連携

ここでは，このロボットをタブレット端末と組み合わせることで，人と機械のインタフェースとして用いる．具体的なサービス内容としては，IoT 機器により認識した人の状況に応じて，ロボットが人と適切な対話を行うアプリケーションを考える．サービス機能は以下のとおりである．

- ロボットは，ユーザからの語りかけをトリガーにサービスを開始する
- ロボットは，顔認証によりユーザを識別する（顔認証を許可しない場合には省略）
- ロボットは，ユーザ情報およびその日の状況に応じてユーザに応答を返す

このとき，ロボットがユーザに返す応答の内容は，プライバシ情報の開示のレベルにより異なったものになる．例えば，開示レベルが低い場合には，天気予報やニュースなど，一般的な情報を基に返答を行うが，内面・身体情報の履歴を開示している場合には，健康状態に応じたサービスの提供を行うことなどが考えられる．

### 4.3 取得されるプライバシ情報

本サービスにおいて取得されるプライバシ情報は，組み合わせる IoT 機器の種類により異なるが，ここでは，ロボットに内蔵されたカメラ・マイクの他，温度・湿度センサ，バイタルセンサ（脈拍，呼吸，体温）から取得される情報，およびクラウド型サービス等から取得されるオンライン情報（スケジュール情報，SNS の情報など）を対象に，取得情報を考える．図 2 に示す階層ごとにプライバシ情報の開示レベルを設定した場合，以下の情報が機械に取得されることになる．なお，開示により以下の項目が必ず取得されるようになるわけではなく，「取得が可能になる」という状況である点に注意が必要である．

- センサー：なし
- ID 関連情報：ID 情報，脈拍数，呼吸，体温
- 個人識別情報：声・話し方，容姿・顔，表情，仕草，位置，場所，行動パターン
- 内面・身体情報：ストレス状態，感情，健康状態
- 社会的情報：人間関係

## 5. 利用シナリオによる検証

### 5.1 シナリオの内容

本章では，4 章で設計したアプリケーションに対する利用シナリオを想定することにより，フレームワーク機能の実現可能性を検証する．ここでは，ユーザが，朝出かける前に，コミュニケーションロボットとの会話により，いくつかの IoT サービスを利用する場面を考える．具体的には，

> ユーザがロボットに「おはよう」と語りかける．それを契機に，ロボットはカメラにより取得したユーザの顔画像によりユーザを認識し，「おはよう，○○さん」と返答する．ロボットは，家庭内に設置された IoT 機器やユーザが装着するバイタルセンサから，温度・湿度等の環境情報やユーザの脈拍，体温等を取得する．また，クラウドサービスからカレンダー情報等のオンライン情報を取得し，それらのデータや，そこから推測される情報を用いて，様々な情報提供サービスを生成し，対話形式でユーザに情報を提供する．

というシナリオを考える．ユーザの状況に応じて，ロボットの簡易動作を伴うサービスが提供されることや，タブレットを通じた情報のやり取りが行われることもある．

アプリケーションのユーザとしては，3 つのタイプを想定する．情報リテラシが高くプライバシ情報の開示に対して厳格なユーザ，情報リテラシが高くプライバシ情報の開示に積極的なユーザ，情報リテラシが低くプライバシ情報の開示に対する意識が希薄なユーザの 3 種類である．情報リテラシが高い場合には，開示レベルの個人化の程度を高め，低い場合には平均化した設定を推奨することにする．

### 5.2 適正化の方法

#### 5.2.1 開示に厳格なユーザの場合

ユーザ情報に基づき，プライバシ情報の開示に対して厳格なユーザであることを判断し，対応する適正化モデルにより提供サービスの内容を決定する．例えば，ID 関連情報までをシステムが取得する設定になっている場合，ロボットがユーザを識別した状態でサービスを提供するため，名前を呼ぶことは可能だが，環境情報の取得は行われず，天気予報等の一般的な情報を基にロボットが返答を生成する．

ユーザの状況に合わせた，よりきめ細かいサービスを受けたい場合には，ユーザがシステムにサービス追加の要求を出すことで，サービスが追加される．このとき，サービス追加によるプライバシ情報の開示度合いの変化が可視化され，ユーザはシステムとのインタラクションにより適正化モデルを更新するか否かを判断する．例えば，部屋の CO2 濃度に応じて換気を行うサービスを追加する場合，行動情報や身体情報が推定される可能性とそのリスク度合いがユーザに提示され，ユーザはその内容に従いサービス追加の判断を行うことになる．

情報リテラシが高いユーザに対しては，設定の煩雑度を減らすために，開示に厳格なユーザに共通の設定をベースにしながら，IoT サービスの追加や削除に応じて，サービスごとのきめ細かな設定を実現する．情報リテラシの程度の判定には，2 章で述べた方法を用いる．なお，次項で示す開示に積極的なユーザも，サービスごとの開示度合いの設定が可能である．

#### 5.2.2 開示に積極的なユーザの場合

上記と同様に，対応する適正化モデルにより提供サービスの内容を決定する．例えば，社会的情報までをシステムが取得する設定になっている場合，環境情報，バイタル情報，ユーザ個人の情報などを組み合わせたサービスの提供が可能になり，健康・精神状態や嗜好，それまでの履歴やその日のスケジュールに合わせて朝食の献立をレコメンドしてくれるサービスなどの提供が可能になる．

この場合でも，ユーザは必要に応じてプライバシ情報の開示度合いを確認し，開示したくない情報を個別に開示しない設定に変更することができる．このとき，現在提供されているサービスとプライバシ情報との関連が提示され，ユーザはその内容に従い情報開示の有無を判断することになる．例えば，健康状態を提供しない設定に変更した場合，健康状態を利用したサービス一覧が提示される．

情報リテラシが高いユーザに対しては，設定の煩雑度を減らすために，開示に積極的なユーザに共通の設定をベースにしながら，プライバシ情報の追加や削除に応じて，情報ごとのきめ細かな設定を実現する．なお，前項で示した開示に厳格なユーザも，プライバシ情報ごとの開示度合いの設定が可能である．

#### 5.2.3 開示に対する意識が希薄なユーザの場合

上記と同様に，対応する適正化モデルにより提供サービスの内容を決定する．プライバシ情報の開示に対する意識が希薄なユーザに対しては，平均的な開示度に従った平均的なサービスを提供することとする．例えば，個人識別情報までをシステムが取得する設定になっている場合，ユーザのいる場所（寝室，キッチンなど）に応じてロボットが応答内容を変えるサービスなどの提供が可能になる．

ユーザは必要に応じてプライバシ情報の開示度合いを確認することができるが，開示度合い変更の自由度を制限し，情報リテラシが低いユーザに共通の設定をベースにしながら，3 段階程度の粒度での変更を許容する．

### 5.3 今後の課題

以上のように，ユーザ種別，および要求する開示レベルを設定することにより，ユーザの特性に応じた適正化モデルの更新が可能になる．適正化モデルの更新方法（利便性とリスクを考慮した開示度の決定方法），具体的なインタラクションの方法（自然なインタラクション）については今後の検討課題であるが，フレームワークとしての適正化の可能性は検証できたと考えられる．

## 6. おわりに

本稿では，人と機械の信頼関係構築フレームワークの検証を目的に，フレームワークでの利用を前提としたロボットアプリケーションを設計し，その利用シナリオを提示することにより，フレームワーク機能の実現可能性を検証した．本稿の結論は以下の 2 点である．

- フレームワーク検証のためのロボットアプリケーションとして，ロボットが人と適切な対話を行うアプリケーションサービスを設計した．
- 利用シナリオを策定することにより，プライバシ適正化の検証を行い，プライバシ情報分類の階層化ごとに開示度レベルを指定することで，ロボットとの自然なインタラクションによる適正化の可能性を検証した．

今後，設計したロボットアプリケーションを用いて，被験者が家で生活する環境で，いかにプライバシを適正化しながらロボットと共同生活が可能かを実証していく予定である．具体的には，奈良先端科学技術大学院大学に設置されているスマートホーム実験設備（1LDK の住環境）に，各種センサ・コミュニケーションロボットを設置し実験環境を構築する．そして，数名の被験者に実際に生活してもらうシナリオを設計し，被験者がどの程度プライバシ情報をセンシングされていたかを把握でき，センシングされたプライバシ情報の公開範囲をいかに自然な形で（小さな負担で）調整できたか，ロボットの信頼関係がどの程度構築されたかを調査する予定である．

**謝辞** 本研究は，JSPS 科研費 17KT0080 の助成を受けたものである．

### 参考文献

[1] Yasumoto, K., Yamaguchi, H. and Shigeno, H.: Survey of Real-time Processing Technologies of IoT Data Streams, *Journal of Information Processing*, Vol. 24, No. 2, pp. 195–202 (2016).
[2] 菅沼拓夫，安本慶一，加藤由花：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，情報処理学会研究報告 DPS175，pp. 1–7 (2018).
[3] 萱場啓太，生出拓馬，阿部　亨，菅沼拓夫：利用者の多様性を考慮したパーソナルデータ流通制御支援手法，信学技報 IN，Vol. 117, No. 205, pp. 1–6 (2017).
[4] Agarwal, Y. and et al.: ProtectMyPrivacy: Detecting and Mitigating Privacy Leaks on iOS Devices Using Crowdsourcing, *Proc. MobiSys'13*, pp. 97–110 (2013).
[5] Liu, R., Cao, J., Yang, L. and Zhang, K.: Recommendation for Privacy Settings of Mobile Apps Based on Crowdsourced Users' Expectations, *Proc. IEEE MS 2015*, pp. 150–157 (2015).
[6] 馬場口登，西尾修一：ネットワークロボットのセンシングとプライバシー保護技術，信学会誌，Vol. 91, No. 5, pp. 380–386 (2008).