

3 センサアクチュエータネットワークの情報処理基盤

中澤 仁¹ 徳田 英幸¹

¹ 慶應義塾大学環境情報学部

■ センサアクチュエータネットワーク

人の日常生活をとりまくユビキタスコンピューティング環境には、主に3つの役割がある。センシング (S) は、人の活動や空間の状態を検出する役割であり、これを実現するために人や空間、モノにセンサデバイスを搭載したノード (無線センサノード) が取り付けられる。プロセッシング (P) は、センサデバイスから取得した値を処理し、実空間に対して行うアクションを決定する。処理は、無線センサノードや携帯電話、あるいはネットワーク上のサーバで行われる。アクチュエーション (A) は、実空間に対して行うアクションを、情報家電機器やネットワークロボットなどにより実現する過程である。アクションの実現に用いられる機器やモノを、本稿ではアクチュエータと呼ぶ。アクチュエーションの結果、実空間の状態はそれ以前の状態から変化するため、ユビキタスコンピューティング環境は次のセンシング→プロセッシング→アクチュエーションのサイクルを開始する。このように、人とユビキタスコンピューティング環境とは、センサ (実世界からの入力) とアクチュエータ (同じく出力) を介して結びついており、それらはプロセッサを介してネットワーク化されている。本稿ではこのネットワークを、センサアクチュエータネットワークと呼び、ユビキタスコンピューティング環境における情報処理基盤と位置づける。

ユビキタスコンピューティング環境に存在する人の視点で、上述した機能が発揮される場所について

考えると、センシングは、その人が存在する空間、その人自身、あるいはその人の周辺に存在するモノ (こちら側, HERE) に関するセンシングと、より遠方の、たとえばその人がこれから出かけようとしている空間 (あちら側, THERE) に関するセンシングとが考えられる。アクチュエーションも同様に、こちら側に対するアクチュエーションと、あちら側のそれが考えられる。プロセッシングも、その人が持つスマートフォン上でセンシングデータを処理する場合と、ネットワーク上のサーバマシンで処理する場合を考えると、やはり前者はこちら側、後者はあちら側である。以上より、センサアクチュエータネットワークは、「Sensing, Processing, and Actuation, Here or There」すなわち HOT-SPA (図-1) とモデル化できる。

このモデルを用いることで、ユビキタスコンピューティング環境の多様なアプリケーションを整理できる。図-1に含まれる簡単な例を使って説明すると、「コーヒーが冷め切らないうちに飲むことを促す」ものぐさ系アプリケーションは **Sh** → **Ph** → **Ah** と考えることができる。すなわち、自分の手元のコップで温度計測を行い、得られたデータを自分の端末 (この場合はケータイ^{☆1}) に送信して解析し、自分のいる空間にアクチュエーションする。同様に、よく知られた見守りアプリケーションも次のように整理できる。

St → **Ph** → **At** 老人の湯飲みにつけた温度センサの

.....
^{☆1} 本文中で「ケータイ」と記述するときは、ガラパゴス化した日本の携帯電話を意味する。「携帯電話」と記述するときは、携帯可能な通話および通信のための装置一般を意味する。

情報を自分のケータイで受信して監視し、通常と異なる動きが見られたらその老人に遠隔から話しかける。

St → **Ph** → **At** 自分の湯飲みにつけた温度センサの情報をサーバへ送信して、他の人の情報と総合して解析し、異常を検出したらサービス運営者がその人に遠隔から話しかける。反応が得られなくなった湯飲みの持ち主は倒れているかもしれないし、湯飲みを頻繁に使用している人はカフェインの過剰摂取で健康を害しているかもしれない。

このように、センサアクチュエータネットワークを使用したユビキタスコンピューティングのアプリケーションは「こちら側」と「あちら側」の組合せでリッチになる。本稿ではまず、センサアクチュエータネットワークを構成するセンシング、プロセッシング、およびアクチュエーションの技術を「こちら側」と「あちら側」の視点で整理する。そして、ユビキタスコンピューティング環境の未来像として、単に人の生活を便利にするだけでなく、人と人との間に新たな関係を創出したり、既存の関係を強化したり、あるいは人や組織の能力を強化したりする「スマートコミュニティ」の基盤技術について述べる。我々はこれをスマートコミュニティと呼ぶ。

■ HOT : こちら側とあちら側

人の生活空間に各種のセンサを設置 (<http://tscanweb.osoite.jp/> など) したり、ロボットによって人の生活を支援 (<http://kansai-robot.net/> など) したりする試みが多く行われており、それらの成果は未来の高度なユビキタスコンピューティング環境として結実することが期待される。こうした環境においては、人の周りに無数のセンサやアクチュエータが存在することとなるため、人の持つ端末に対して、必要なときに必要なタイプのデータを必要なだけ収集できるこ

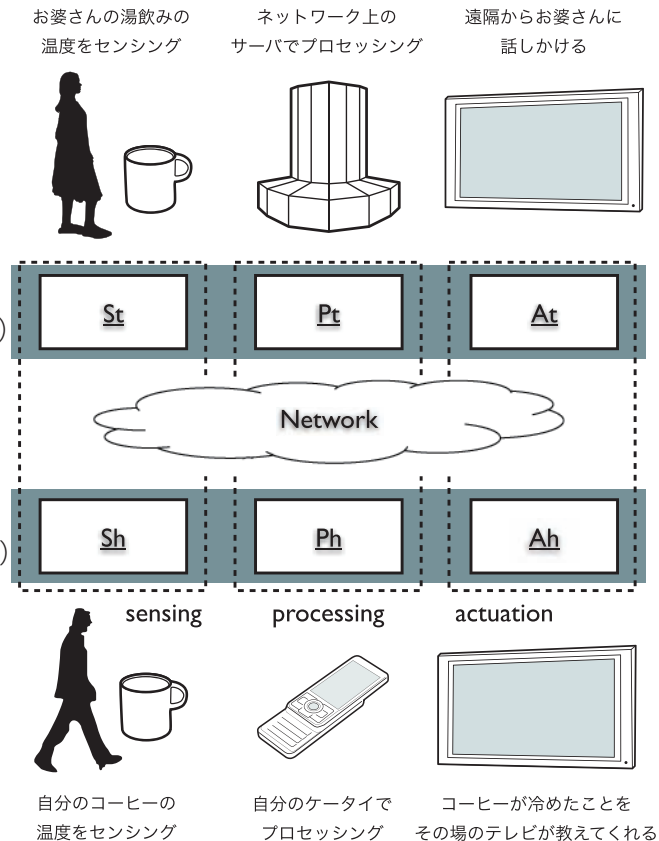


図-1 センサアクチュエータネットワークのHOTS-SPAモデル

とが望ましい。さらに、実空間の特に屋外においては人の数も無数であり変動する。このように、未来のセンサアクチュエータネットワークは非常に複雑で動的に変化する。図-2に、センサアクチュエータネットワークのイメージを示す。実空間には無数のノードが存在し、人はこちら側かあちら側の端末でアプリケーションを動作させながらその中を移動していく。アプリケーションは、必要とするセンサアクチュエータネットワークを人の移動先で動的に構築し、処理を達成する。図では、こちら側のノードのみを使用するアプリケーションを想定している。人が中央地点に移動しているときは、点線で示すセンサアクチュエータネットワークが構築される。このとき、図では人が1人しかいないが、実際には無数の人が同時に複数のアプリケーションを動作させながら移動する。また、センサやアクチュエータも移動する可能性がある。したがって、実世界のセンサアクチュエータネットワークは複雑である。以下に、こちら側とあちら側の視点で、重要となる技術を概説する。

3. センサアクチュエータネットワークの情報処理基盤

センサアクチュエータネットワーク

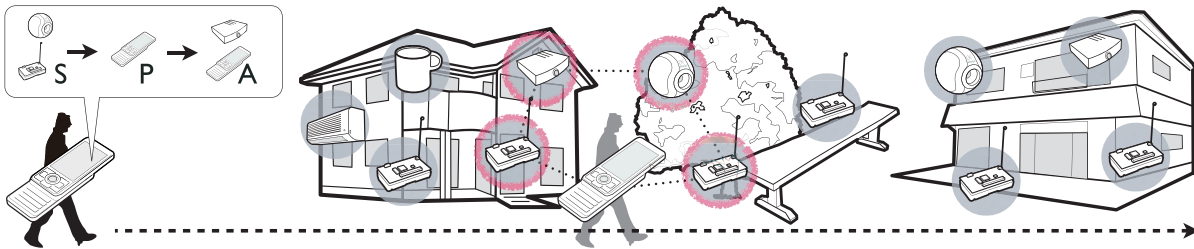


図-2 センサアクチュエータネットワークのイメージ

■ HERE 技術

一般的に無線センサネットワークでは、センサデータは移動しないシンクノードへ収集され、ユーザアプリケーションはシンクノードからデータを選択的にダウンロードして処理する。一方で図-2に示したようなセンサアクチュエータネットワークでは、必要に応じて必要なデータをシンクノードを介さずに任意の端末に集約する必要がある。本稿ではこれを、「HERE化」と呼ぶことにする。HERE化されたセンサアクチュエータネットワークでは、人の端末はセンサデータを直接（ネットワーク的に遠方のシンクノードを介さずに）取得でき、同様にアクチュエータを直接駆動できる。

HERE化には、大きく分けて端末側、ネットワーク側、およびセンサやアクチュエータ側の3つの技術が必要となる。端末側では、センシング、プロセッシング、アクチュエーションのいずれかまたはすべての機能を保持する組み込みデバイスが必要となる。近年の携帯電話には、GPSや加速度センサ、ジャイロセンサ、照度センサなどさまざまなセンサデバイスが搭載されており、それらのデバイスから人の位置情報や姿勢情報、周囲の環境情報などをセンシングできる。それらの情報は、同携帯電話内のプロセッサで処理することにより、より高次のコンテキスト情報を認識、生成できる。このように、センサやアクチュエータを端末内に組み込んでしまえば、上述したようなセンサアクチュエータネットワークを構築可能となる。

ただし、端末内に組み込むことが非効率であるセンサ（大気成分に関するセンサ等）や、それが不適当なアクチュエータ（ビジブルロボットなど）は依然として端末外に存在し続けるため、端末とそれらの機器

を柔軟にネットワーク化する必要がある。このために、まず端末側ではそれらの機器と通信できるネットワークインタフェースを搭載する必要がある。近年の携帯電話はスマートフォンのそれに代表されるように、携帯電話網への接続性に加えて無線LANへの接続が可能となっている。HERE化にはこれらに加えて、SunSPOTやMoteに代表される多くのセンサノードが採用しているIEEE802.15.4ネットワーク等への接続が必要となる。筆者らは、端末側のHERE化技術の研究に取り組んでおり、図-3に示すような新しいハードウェアを構築してきた。これらは、近傍の無線センサノードから取得したセンサデータや、それ自身が持つセンサデバイスから取得できるセンサデータを、デバイス内に記録できる。またグローバルネットワークを介してそれらのデータを送信するほか、THEREにあるデータを取得し、ユーザに提示することも可能である。特にMote Attachment Boardは、既存のケータイをIEEE802.15.4対応とする技術である。

一方、ネットワーク側ではより複雑な問題が2点存在し、活発な研究領域となっている。1点目は、経路制御である。図-2のセンサアクチュエータネットワークでは、シンクノードとしての端末が移動する。また、センサノードやアクチュエータノードが移動する可能性もある。この想定は、これまでの研究でよく見られる据え置き型センサネットワークとは大きく異なる。据え置き型センサネットワークでは、たとえば戦場の上空から無線センサノードをばらまき、データが基地に集まるよう経路を動的に決定するというシナリオが、特に米国の研究者によって提示されている。このとき、一度設置された無線センサノードやシンクノードはほとんど動かないことが想定されてい

る。これに対して実際的なセンサアクチュエータネットワークは、モバイルセンサノード、モバイルアクチュエータノード、およびモバイルシンクノードの集合であるため、新しい経路制御手法が必要となる。このうち、モバイルシンクノードを前提とした研究が近年進んできている²⁾。

もう1点は、センサアクチュエータネットワークを構成する各種ノードの「記述」である。人の持つ端末では複数のアプリケーションが動作しており、アプリケーションごとに異なるセンサデータやアクチュエーションを必要とする。したがって、必要なデータを保持しているセンサノードや必要な機能を提供できるアクチュエータ等を、端末がそれ自身の周辺から発見できるよう、各ノードはその機能や性能、通信方法等を他のノードに対して明らかにする必要がある。本稿ではこのことを「記述」と呼ぶことにする。ユビキタスコンピューティング環境におけるサービスの記述はいろいろな方式で行われており、特にBluetoothやUPnPなどの通信プラットフォーム内では、デバイスプロファイルなどとして存在する。しかし、センサの能力を記述する有力な方式が存在しないことや、既存の記述方式が通信プラットフォームごとに閉じていて互換性がないことから、センサアクチュエータネットワークにおけるインタオペラビリティが十分に確保されていない。この点について筆者らは、ユビキタスネットワークフォーラム (<http://www.ubiquitous-form.jp/>) において Universal Service Description Language という XML ベースの記述言語を提唱している。

■ THERE 技術

HERE 技術では捉えきれない、空間的、時間的に広範囲な現実世界の変化を情報システムの中に取り込むことを本稿では「THERE 化」と呼ぶことにする。THERE 化の重要な試みの第一は、これまで定量的に捉えることができなかった事象を、センサアクチュエータネットワークによって可能とするも



Activity Recorder



耐故障ユビキタスセンサ



Mote Attachment Board

図-3 uCore デバイス

のである。図-4に示す、農場の微気象を観測するフィールドサーバ (<http://model.job.affrc.go.jp/FieldServer/>) や、スイスアルプスの温度分布を観測する PermaSense (<http://www.permasense.ch/>)、筆者らの都市微気象観測の試み⁸⁾はその一例である。THERE 技術は、このような物理的広がりを持つデータの存在に対し、近年では、ネットワークの向こうにある計算機においてさまざまな情報を処理したり、情報を蓄積する手法が一般的となってきた。大規模なデータセンタなどに存在するこうした計算機は、利用者からは計算機の実態が見えずその姿を例えてクラウドコンピューティングとも呼ばれるようになってきている。HOT-SPA モデルにおける THERE 技術は、このようなネットワークの先の計算機能、計算機能を備えたさまざまな機器にセンシング、プロセッシング、アクチュエーションといった処理を委ねるアプローチである。現在のクラウドコンピューティングが主に文書などの固定化された情報を取り扱うのに対し、HOT-SPA モデルでは、逐次変化するセンサやアクチュエーションもその構成の中に取り込む。本稿では、センサアクチュエータネットワークのアプリケーションがこちら側のデータを獲得、解析して動作するための主要技術として、データへのアクセス技術と解析処理技術を取り上げる。

センサ情報は1つ1つは限定された時空間に紐付けられた情報であり、その場その瞬間で消費するだけでなく、蓄積し適切な手法で時空間的に比較、解析することで意味が見いだされることが多い。このため、センサデータを蓄積し、時空間的に情報を切り出しアクセス可能にする技術が必要とされている。1つが、

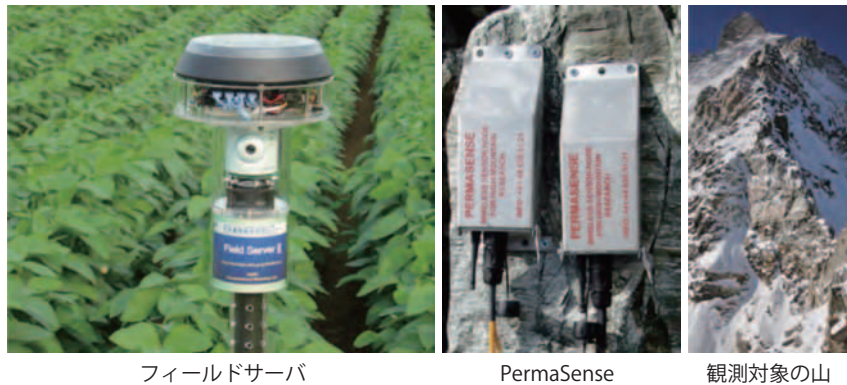


図-4 THERE センシング

センサのアドレスや属性をサーバで管理し、データの利用者はセンサ情報を提供するサービスに直接接続するというアプローチである。Microsoft Researchで研究が進められているSenseWeb¹⁾がこの手法の代表である。この手法はセンサの多様性を実現する一方、統一的な手法でセンサデータのアクセスや、複数のセンサを比較するようなセンサデータの解析処理が難しい。もう1つのアプローチが、センサデータも含めすべて単一アーキテクチャのシステム上に保持するアプローチである。Webサービスとして開発が続いているPachube (<http://pachube.com/>)はセンサ情報を集積するためのWeb APIを提供しており、同サービス内でデータを含めすべての情報を蓄積している。大量のデータ登録や要求が1点に集中するため、この仕組みを支えるシステム構築は困難であるが、同一システム内にすべてのデータが揃うためシステムをセンサデータの事後処理のために最適化することが可能である。

センサ情報は直接アクセスするだけでなくさまざまな事後処理や高度な解析処理を経てから利用することが必要になる。たとえばGPSで取得した誤差を含む移動軌跡データを平滑化しデータを整えたり、蓄積した気温データから最高気温や最低気温を導き出すといった処理である。またこうした情報の空間的な分布や経年変化、人の動きからマーケティング分析を行うなどさらに高度な情報処理の可能性も広がる。センサ情報は、一般に数値情報の時系列での連続データであり、センサ情報処理にはしばしば大量の計算処理が必要となる。この目的のためにも、「あちら側」

だからこそ用意できるクラウドコンピューティングプラットフォームは有効である。GoogleやHadoopなどに採用されているmap/reduceは、大規模なデータ処理を効率的に分散並列実行する手法の1つである。こうしたプロセッシングを利用するための汎用的な仕組みは研究開発の途上であるが、たとえば空間情報処理の分野ではOGC (Open Geospatial Consortium)が、WPS (Web Processing Service, <http://www.opengeospatial.org/standards/wps/>)の標準化に取り組んでいる。筆者らは、アプリケーションに応じた世界的規模で統合されたセンサネットワーク構築のために、計算処理の一極集中や大量のデータ転送を極力避けつつ、条件に適した最適なセンサデータ処理ネットワークを再構成できるSensingCloud⁴⁾を研究開発している。図-5にSensingCloudの動作概要を示す。アプリケーションからのリクエストに応じてIndexサーバが適切なノードを選定し、マスタノードにおいてデータの集約や解析処理を行った後にアプリケーションに結果を戻す。

■ SPA：センシング、プロセッシング、アクチュエーションの今後

前章で、こちら側とあちら側の視点でセンサアクチュエータネットワークの現状について述べた。これを実世界のシステムに応用するには数多くの課題が残っているが、本章では、センシング、プロセッシング、およびアクチュエーションの各観点で筆者が代表的

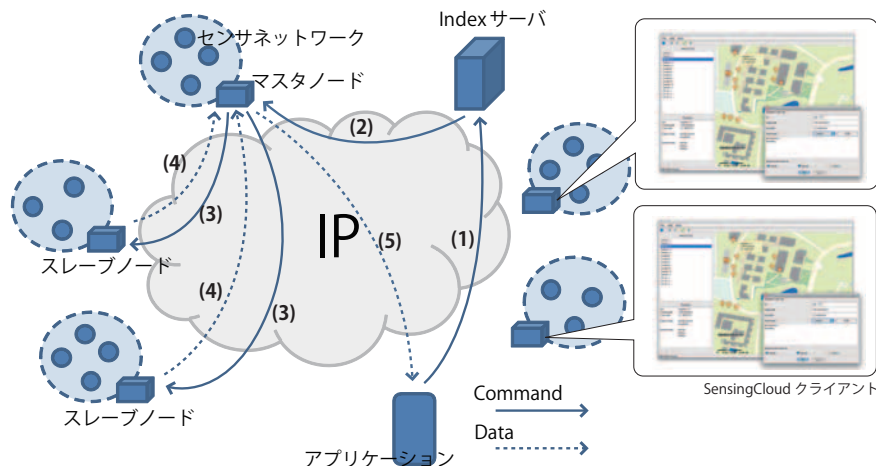


図-5 SensingCloudの動作概要

と考える問題を概説する。

■ センシング技術の課題：ロボティックセンサネットワーク

前章で、センサアクチュエータネットワークではセンサノードも動くことに触れた。なぜ動くのか。センサ単体では、センシング範囲はセンサの性能に依存する。たとえば温度センサであればそのセンサ周辺の数cmのスポットの温度しか計測できず、またRFIDリーダのようなセンサでは数メートルから数百メートルの固定したエリアしかセンシングできない。しかし、センサを移動可能なロボティックアクチュエータに搭載することで、そのセンシング範囲はアクチュエータの移動距離分拡大する。このような物理的に移動可能なアクチュエータに搭載されたセンサのことをロボティックセンサと呼ぶ。ロボティックセンサの移動パターンには4種類存在し、同一地点で回転するもの、1次元的な直線移動するもの、2次元平面上を移動するもの、3次元空間内を移動するものがある。米国インテル研究所では、センサを2次元平面上を移動可能なロボットに搭載することで、より実用的なセンサネットワークを構築している⁶⁾。また筆者らは、センサを単純な1次元動作(回転運動や直線運動)を行うアクチュエータに装着することで、その計測範囲の拡大を狙った研究を行っている。

一方で、センサを単純にロボットに載せて動かすだけでは、そのセンサのデータを必要とするアプリケー

ションにとって意味をなさない場合がある。すなわち、アプリケーションによっては特定の場所を一定以上の頻度でセンシングする必要があるなどといった制約が考えられる。したがって、複数台のロボットを自律分散協調的に動作させてアプリケーションの要求を満たす技術や、アプリケーションのセンシングに関する要求を宣言させ、それをロボットへ伝達する共通のプロトコル技術等が今後の課題となる。

■ プロセッシング技術の課題：網内分散並列確率推論

センサアクチュエータネットワークにおけるプロセッシングとは、センシングで得たデータを処理し、実世界へのフィードバックを行う上で、アクチュエータに対してどのような制御をすべきかを決定する機能を提供する。これにはいくつかの手法が存在するが、確率推論は、エビデンスが与えられた場合にある事象が起り得る確率を推論する手法である。確率を用いることで、センサアクチュエータネットワークにおけるノードの故障や実世界に存在する各種の不確定要因など、不確実な状況下でも妥当な推論を実行できる利点がある。センサデータの解析モデルの1つにベイジアンネットワーク^{5), 7)}がある。図-6に、「空間Aの快適さ」というコンテキストを抽出するためのベイジアンネットワークを示す。各楕円がコンテキスト、センサデータを表す確率変数にそれぞれ対応する。Comfortがコンテキストに対応し、Temperature

(1), Humidity (1)は1つのセンサノードから取得できる温度および湿度に対応する。同様に(2), (3)も異なるセンサノードから取得できるセンサデータ群を表す。これらのセンサデータに対応する確率変数は、Comfortと直接的な依存関係を持ち、依存関係は2つの確率変数間を結ぶ有向リンクとして表現される。

この推論をあちら側で行うか、こちら側で行うかの選択は重要である。**centralized processing**は、センサネットワークで得たすべてのデータをセンサネットワーク外(あちら側)のサーバに集約し、推論を行う。したがって、あちら側のサーバがボトルネックとなり、それが停止するとセンサアクチュエータネットワークの全機能が停止する。**in-network processing**は、各センサノードにプロセッシングエンジンを載せ、センサノード自体が推論の計算を分散、並列に行う手法である。サーバに依存せずにセンサノード間でプロセッシングが可能である。中間ノードでデータの集約や圧縮を行うことでデータ送信量の低減を目指す研究やセンサネットワーク内で論理グループを作り確率推論を行う研究がある。筆者らは、自律的にプロセッシングを行うことでコンテキストを抽出しアクチュエーションを行う自律型センサネットワークを開発している。自律型センサネットワークを実現可能とするためのセンサネットワーク上で動作可能で軽量のコンテキスト検出機構である Hybrid Bayesian Inference Mechanism (HBIM) を提案し、センサネットワークと連動した空調システムへ適用し、その有効性を実証した。

■ アクチュエーション技術の今後：ユニバーサルインタオペラビリティ

センサアクチュエータネットワークにおけるアクチュエーションとは、プロセッシングで決定された制御命令をアクチュエーションデバイスに送り届け、動作させ、実世界に対して影響を与えることである。アクチュエーションデバイスは、BluetoothやUPnP, ECHONETなど何らかの通信プラットフォームに接続され、ネットワークを介して制御可能であることが前提である。アプリケーションによっては、異なる通

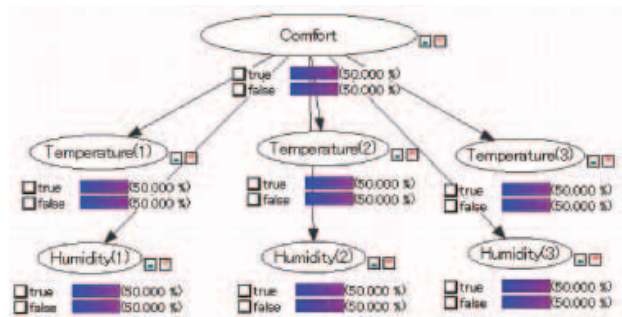


図-6 Comfort コンテキストを表すベイジアンネットワーク

信プラットフォーム上で動作する機器を同時に制御したり、それらを連携させたりする必要が生じる。このとき、通信プラットフォーム間のプロトコル、デバイス抽象化手法、通信可能なデータ形式等の違いが、そうした連携を阻害することがある。この問題に対処し、異なる通信プラットフォーム上の機器を連携可能とする技術が、ユニバーサルインタオペラビリティ技術³⁾である。

ユニバーサルインタオペラビリティ技術では、主に次の課題が重要となる。

マルチプロトコルサービス発見 制御命令をアクチュエーション機器に送り届ける際、対象の機器を発見する必要がある。液晶テレビやAV機器などの家庭向けデバイスには、UPnP, DLNAやBonjourが実用化されている。これらの通信プラットフォームは、音声や映像などのマルチメディアデータや、プリンタなどの機器情報を同一ネットワークセグメント内の機器間で共有することを目的として作られている。スピーカやヘッドセット、キーボードなど、近距離・低速通信向け機器では、Bluetoothが広く利用されている。これらの通信プラットフォームでは機器発見に用いるプロトコルが異なっており、ユニバーサルインタオペラビリティを実現するにはそれらすべてに対応する必要がある。

プロトコル変換 制御命令をアクチュエーションデバイスに送る際、送信元と送信先のそれぞれで利用される通信・サービス発見・制御プロトコルはすべて同一でなければならない。しかし、前述の通りさまざまな通信プラットフォームが登場している

■特集 センシングネットワーク■

現在、これらプロトコルが一致せず、相互連携できないデバイスの組合せが多数存在する。そこでユニバーサルインタオペラビリティ機構では、プロトコル変換によってそれらの機器を通信可能とする必要がある。これにより相互連携可能な機器が広がり、新たなサービスの創出を期待できる。

ユニバーサルサービス記述 前述のように、センサやアクチュエータの機能等の記述方式は通信プラットフォームごとに異なっている。一方、アプリケーションが必要とするセンサやアクチュエータは、そのアプリケーションが必要とする機能を満たしてさえいれば、どの通信プラットフォーム上に存在してもよいはずである。したがって、ユニバーサルインタオペラビリティ機構では、機器の機能や性能等を、その通信プラットフォームに依存せずに記述できる必要がある。

■スマートコミュニティの実現へ向けて

最後に、ユビキタスコンピューティング環境の未来像として、スマートコミュニティとその応用について述べる。

■実空間と情報空間の融合

FacebookやmixiなどのSNS（ソーシャルネットワークサービス）が多数登場し、多くのユーザ数を獲得している。SNSに代表されるように、実空間の人やモノのつながりを情報空間で利用可能とすることで、人間同士の結びつきを強くしたり、新たな人間関係を創出できる可能性がある。一方、我々は単に他人とつながっているだけでなく、家庭、学校、会社、サークルなど、何らかのコミュニティ（集団）に属している。ここにおけるコミュニティとは、ネットワーク（つながり）の中である特定の判断基準を与えた際に、密な関係性を持って現れる特定の集団を指す（たとえば家庭とは血縁関係・居住場所などの基準によって浮かび上がるコミュニティである）。実空間で我々が認識するさまざまなコミュニティに加え、潜在的に存在するあらゆる実体の関係性を情報空間に投影し、

利用可能とする。すなわちスマートコミュニティとは、実空間における社会活動（人と人のコミュニケーションおよび人とモノのインタラクション）をセンシングし情報空間で認識した結果、動的に創出される人・モノの密な関係性からなる集合である。

スマートコミュニティの単純な例として、旅行中の家族や、人と、その人が携帯しているモノの集合が挙げられる。これらは、情報空間に抽出された位置情報が等しい群であり、それらを対象として、位置情報が異なった場合に何らかの警告を発するソフトウェアを動作させておけば、迷子防止や忘れ物防止を支援できる。すなわち、人と人、人とモノの結びつきを強化するための支援を行える。また、学童の位置情報や、「勉強中」あるいは「遊び中」といったコンテキストを情報空間へ抽出したとする。このとき、放課後に1人で遊んでいる学童のスマートコミュニティに対して、特定の広場へ行くようにアドバイスするソフトウェアを動作させれば、人と人の新しい結びつきを創出する可能性がある。このようにスマートコミュニティは、さまざまな粒度の人やモノの集合を、それらに結合されたデジタル情報の同質性から動的に形成し、拡張・支援することが期待できる。

■HOT-SPAによるスマートコミュニティ構築

HOT-SPAによるスマートコミュニティ構築のプロセスを、図-7に示す。図中では、人やモノなどさまざまな実体がノード（点）として表されており、センシング技術によりこちら側、あちら側のさまざまなノードをネットワークとして相互接続するとともに、物理情報を情報空間へ抽出する。なお、図中には描かれていないが、THEREに存在するデータなどもセンシングの対象として含まれる。次に、プロセッシング技術によってスマートコミュニティを構築する。センシングした物理情報やTHEREデータを、時空間的・意味的・感性的な類似性・同質性・相反性などを評価する任意のルールを用いて評価し、関係性の密なノードを抽出し、集合とする。最後に、抽出されたスマートコミュニティを利用したアプリケーションを実現することで、実空間に対するアクチュエーションを

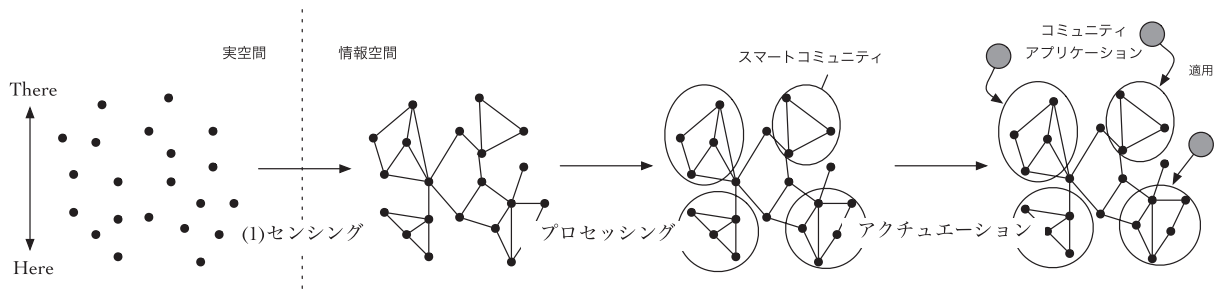


図-7 HOTS-SPAによるスマートコミュニティ構築

行う。

このように、HOTS-SPA技術によって実空間と情報空間の融合を進めることでさまざまな実体同士の関係性を抽出し、それを利用したさまざまなアプリケーションが構築可能となる。実空間における人と人、人とモノのネットワークとコミュニティが多様で変化に富むのに対し、情報空間のそれは静的であり、変化には利用者による明示的な操作を必要としていた。この実空間と情報空間におけるネットワーク性質の違いは、前者における人やモノの突発的な動きや変化に富む組織に対するサービスの脆弱性につながる。実空間における変化や、変化の結果生じた状況を任意のルールによって検知し、その対象となった人やモノの集団を情報空間へコミュニティとして反映・参照可能とすることで、実空間と情報空間が密接に連携した適応的サービスの構築が期待される。

謝辞 慶應義塾大学環境情報学部徳田・高汐・中澤研究会の諸氏に感謝する^{☆2}。

参考文献

- 1) Kansal, A., Nath, S., Liu, J. and Zhao, F. : SenseWeb : An Infrastructure for Shared Sensing, IEEE Multimedia (2007).
- 2) Kim, H. S., Abdelzaher, T. F. and Kwon, W. H. : Minimum-energy Asynchronous Dissemination to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks, SenSys '03 : Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, New York, NY, USA, ACM, pp.193-204 (2003).
- 3) Nakazawa, J., Tokuda, H., Edwards, W. K. and Ramachandran, U. : A Bridging Framework for Universal Interoperability in Pervasive Systems, Distributed Computing Systems, International Conference on, Vol.0, p.3 (2006) .
- 4) Namatame, N., Nakazawa, J., Takashio, K. and Tokuda, H. : SensingCloud : Open and Global Sensor Network using

- Distributed Aggregation Mechanism, Proceedings of the First International Workshop on Ultra-Low-Cost Wireless Sensor Networks and their Applications (ULC-WSN) (2010).
- 5) Patterson, D. J., Liao, L., Fox, D. and Kautz, H. : Inferring High-level Behavior from Low-level Sensors, Proc. of Ubicomp 2003 (2003).
- 6) Sigurdsson, S., Lamarca, A., Brunette, W., Koizumi, D., Lease, M., Sigurdsson, S. B., Sikorski, K., Fox, D. and Borriello, G. : Making Sensor Networks Practical with Robots, In Pervasive Computing, First International Conference, Pervasive 2002. Proceedings (Lecture Notes in Computer Science Vol.2414). 2002, Springer-Verlag, pp.152-166 (2002).
- 7) Sparacino, F. : Sto(ry)chastic : A Bayesian Network Architecture for User Modeling and Computational Storytelling for Interactive Space, Proc. of Ubicomp 2003 (2003).
- 8) 伊藤昌毅, 片桐由希子, 石川幹子, 徳田英幸 : Airy Notes : 緑地計画のための無線センサネットワークによる環境モニタリング, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.69-82 (Jan. 2008).
(平成22年7月1日受付)

^{☆2} 本研究は、NICT委託研究「ダイナミックネットワーク技術の研究開発」の研究成果の一部である。

中澤 仁 (正会員) jjin@ht.sfc.keio.ac.jp
 昭和50年生。慶應義塾大学より博士(政策・メディア)。現在、慶應義塾大学環境情報学部専任講師。分散システム、ミドルウェアシステム、ユビキタスコンピューティング、ディペンダブルコンピューティング等の研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。

徳田 英幸 (正会員) hxt@sfc.keio.ac.jp
 慶應義塾大学より工学修士。カナダ、ウォータールー大学よりPh.D (Computer Science)。現在、慶應義塾大学大学院政策メディア・研究科委員長、同大学環境情報学部教授。ユビキタスコンピューティングシステム、自律分散協調システム、オペレーティングシステム、スマート端末、スマートスペースなどの研究に従事。IEEE, ACM, 日本ソフトウェア科学会各会員。