

6

ユビキタス環境で活躍する エージェント

吉岡 信和 国立情報学研究所

本位田 真一 国立情報学研究所/東京大学

近年、センサ情報を活用するソフトウェアの研究や実用化が進んでいる。さらに、モバイル機器や、外部操作可能な機器の普及により、ソフトウェアが人間活動をさまざまな観点でサポート可能になる。本稿では、このようなユビキタス環境で、エージェントがどう活躍できるかを解説する。具体的には、ユビキタス環境のさまざまな情報や機器を使うことで、エージェントの自律性、協調性、適応性・頑健性がどのように高められるか考察する。さらに、センサ情報を収集するために、エージェントの移動性がどう有効であるかを説明する。

ユビキタス環境で活躍するソフトウェア エージェント

ユビキタスという用語が定着して久しいが、ここ数年の携帯電話に代表される小型端末の高性能化と定額制の高速通信の普及により、いつでもどこでも気軽にコンピュータを利用できる環境が整ってきた。さらに、近年では、FeliCaに代表される無線タグが、カードや携帯端末の中をはじめ鍵の中にも埋め込まれ、買い物や電車や飛行機の搭乗、住居サービスなどさまざまなシーンで電子情報が利用可能になっている。そして現在、生活環境のさまざまな場所に埋め込むことができる小型センサの開発が進んでいる。この発展は、いつでもどこでもさまざまな情報をコンピュータで扱えるユビキタス環境が実現しつつある過程といえるであろう。

総務省が掲げる u-Japan 政策^{☆1}では、2010年までには、道路に埋め込まれた無線タグと杖に埋め込まれた音声装置によって歩行中の老人に危険を知らせるであろうと予測している。今後は、杖だけではなく、家庭内の家電や公共の施設にコンピュータやセンサが埋め込まれ、人々の活動をさまざまな角度から支えるようになると思われる。また、最近では、二足歩行型ロボットが注目されているが、将来的には介護や緊急時などの特定用途向けロボットが実用化され、ユビキタス環境の一員になると予測^{☆2}されている。

これまで、主にハードの発展が先行してきたが、ユビキタス環境の中で社会生活を行うためには、その環境を使いこなすソフトウェアの発展が不可欠である。本稿では、ユビキタス環境でソフトウェアを発展させるために、ソフトウェアエージェントの技術がどのように活躍できるかを解説する。ここでのエージェントとは、自律性、協調性、適応性・頑健性、そして移動性を持つソフトウェアのことを指す¹⁾。ユビキタス環境になることで、これまで考えられてきたエージェントの活躍の場が広がり、より現実社会に対してさまざまなサポートを期待できるだけでなく、ユビキタス環境を支えるインフラにもエージェント技術が応用できると期待されている。すなわち、ユビキタス環境でエージェントが活躍することで、現実社会と電腦社会がより密接になる(図-1)。

ユビキタス環境がソフトウェアを賢くする

エージェントの自律性は、外界に対する知識を蓄積し、推論により目標を達成する行動を起こすことで実現できる。携帯電話の爆発的普及と利用スタイルの変化により、「携帯電話=その所有者」という公理を使うことができるようになった。さらに、ユビキタス環境になれば、その周辺のセンサ情報などから現実社会に関する非常に多く

^{☆1} 総務省 u-Japan 政策,
http://www.soumu.go.jp/menu_02/ict/u-japan/index.html

^{☆2} 総務省日本発 新IT「ネットワーク・ロボット」の実現に向けて,
http://www.soumu.go.jp/s-news/2003/030724_1.html

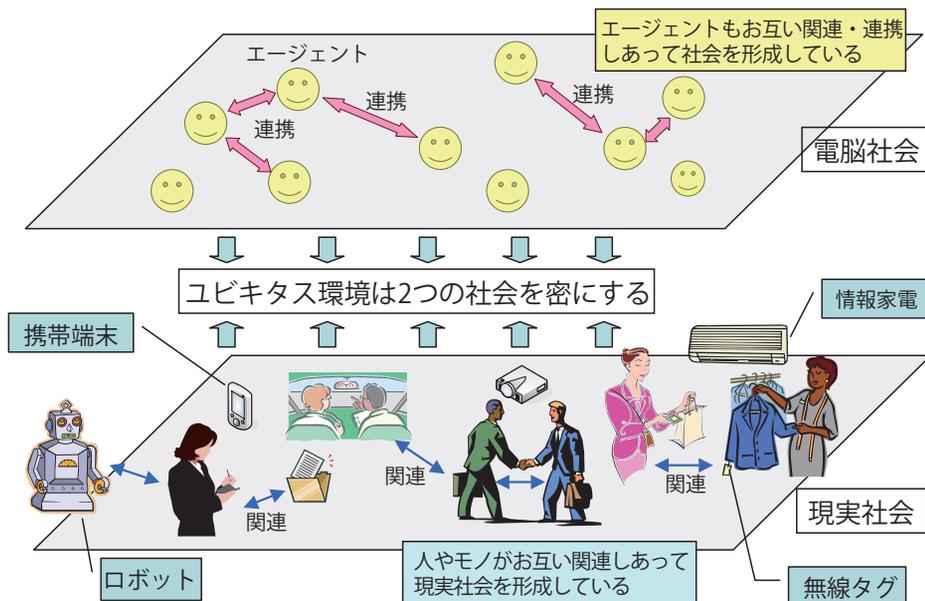


図-1 現実社会と電腦社会

の情報を得ることができる。たとえば、Web 情報の閲覧エージェントを考えてみよう。これまではブラウズ時のマウスやキーボードの動き、辿った Web ページの履歴など、限られた情報のみからユーザの行動を判断していたため、有効なコンテンツ推薦が難しかった。しかし、センシング技術の発展により、ブラウズしているユーザの位置、周辺物、所有物、会話している相手まで把握できるようになれば、ユーザのことを常に見てアドバイスしているような推薦を行える可能性がある。

さらに、コビキタス環境では、エージェントが目標を達成するための手段が増える。スマートビルディングやスマートハウスなどのスマートスペースでは、空調や照明をはじめ、壁やデスクに埋め込まれたディスプレイ、TV やポットなどの家電製品もエージェントの手足として使うことができる。すでに 10 年以上前から、このようなスマートスペースの構想がいくつも提案され、研究対象となってきた^{☆3} (具体的な例は**コラム 1**を参照のこと)。ハードウェアの発展に伴い、これまで研究室の中でしか実現しなかった空間が現実的なものとなってきたのである。たとえば、壁や机と一体化可能な薄型ディスプレイは、すでに普及の段階に入った。また、ホームネットワークを手軽に構築するための技術である UPnP^{☆4} や、そのマルチメディア機器対応版の DLNA^{☆5} の普及により、一般家庭にも普及可能なインフラがそろってきたのである。

コビキタス環境のためのエージェントの自律性の向上は、まず、どの程度多数の情報を効率よく発見・検索・管理できるようにするか、また、どの程度正確に実世界

の多くの状況を把握・推論できるかが評価ポイントである。さらに、エージェントが利用するデバイスをいかに適切に効率よく制御・利用・切り替えられるかがポイントとなる。ここでの「適切」の基準は、セキュリティやプライバシー、ユーザビリティの観点で考慮する必要がある。効率やユーザビリティを評価するには、シミュレーションや実験の必要がある。さらに、エージェントのプロアクティブ性が高まるにつれ、人々が安心してサービスを利用できるという心理的な評価が必要となってくる。

コビキタス環境での協調の広がり

エージェントの協調には、エージェントと人・モノとの協調、エージェントとエージェントの協調、エージェントの仲介による人同士・人とモノとの協調が考えられる。協調によって、それぞれが単独では実現困難な目標を達成することができる。たとえば、エージェントと人が協調することによって、人やエージェントが個々にはできなかった活動や振る舞いが行えるようになる。

コビキタス環境での人とエージェントの協調作業の典型例は、人が保持している機器や周辺に埋め込まれた機器を、エージェントが操作することで人の作業をガイド

☆3 Project Aura, Carnegie Mellon University, <http://www.cs.cmu.edu/~aura/>
 Smart Space Laboratory, <http://www.ht.sfc.keio.ac.jp/SSLab/>
 NIST Smart Space, <http://www.nist.gov/smart-space/>
 MIT Smart Rooms, <http://vismod.media.mit.edu/vismod/demos/smartroom/>
 ☆4 <http://www.upnp.org/>
 ☆5 <http://www.dlna.org/jp/industry/>

コラム 1: Gaia: ユビキタスコンピューティングのためのオペレーティングシステム

Gaia²⁾ は、イリノイ大学で研究開発されているユビキタスコンピューティングのための OS である^{☆6}。Gaia ではさまざまなデバイス(ディスプレイ、スピーカなど)が埋め込まれた環境を想定し、環境自体を1つのコンピュータと捉える。そして、人とコンピュータとのインタラクションと同様、環境とのインタラクションを考える。このインタラクション可能な環境の単位をアクティブスペースと呼んでいる。Gaia は、アクティブスペースの中で、アプリケーションを実行するための機能を提供している。たとえば、図-2の(a)がテストベットのための会議室である。アクティブスペースでは、ユーザと入力デバイス(キーボードやマウス)は、1対1に対応付けられているが、出力デバイスのどれを使うかは、アプリケーションが動的に決定する。アクティブスペースを使ったアプリケーション例として、複数のデバイスを使ったプレゼンテーション管理ツールがある。このツールを使うと、Powerpointの映像を会議室の複数のディスプレイに1つの巨大スクリーンとして同時に表示したり、同じ画像を複数のディスプレイに映したりすることができる。

Gaiaのアーキテクチャは、Kernel層、Application framework層、Application層の3層構造(図-2の(b))からなる。Kernel層には、コンテキストサービス、コンテキストファイルシステム、コンポーネントリポジトリ、イベント管理、プレゼンスサービス、スペースリポジトリ、セキュリティサービスの8つのサービスがある。コンテキストサービスは、コンテキスト情報を提供・利用するためのサービスで、センサ情報、天気などの低レベルなコンテキスト情報や、その情報を元にした高レベルなコンテキスト情報が管理されている。たとえば、部屋で会議中か、プレゼン中かなどを、部屋に誰がいるか、また、どんなアプリケーションが

動いているかなどから推論する。コンテキストは、一階述語を使って表現され(例: context (temperature, room 3241, is 98F))、論理式により高レベルなコンテキストを規定できる。下記が、高レベルのコンテキストの規定例である。

```
Context (number of people, room 2401, >, 4) AND Context
(application, Powerpoint, is, running) => Context (social
activity, room 2401, is, presentation)
```

プレゼンスサービスは、アクティブスペースに存在するリソース情報を管理する。具体的には、アプリケーション、サービスなどの電子的なリソースと、デバイス、人などの物理的な情報を管理し、物理的な情報はセンサ情報などから収集する。スペースリポジトリは、アクティブスペースに存在するハードウェアやソフトウェアの情報を管理する。コンテキストファイルシステムは、ユーザのデータをユーザの近くに転送したり、デバイスの型に合わせてデータ変換したりする機能を持つ。これらOSのサービスを利用することで、アクティブスペースのためのアプリケーションを構築する。Gaiaでは、また、アプリケーションを書くためのC++のライブラリを用意しており、たとえば、下記のようにプログラミングができる。

```
ActiveSpace as1;
as1.hasProp ("containsPerson, "Sal"");
as1.instantiate ();
```

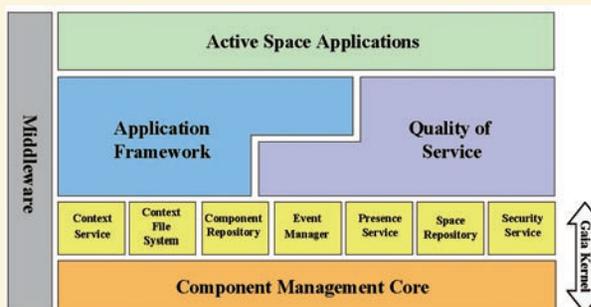
```
Application app1;
app1.hasProp ("class", "Slideshow");
app1.hasProp ("file", "Olympus.ppt");
app1.start (as1);
```

この例では、Salがいるアクティブスペースの最も適切な表示デバイスにOlympus.pptの内容を表示している。

☆6 Active Spaces for Ubiquitous Computing, <http://gaia.cs.uiuc.edu/>



(a)Active Spaceの様子
文献2) から引用



(b)Gaia Arhchitecture
<http://gaia.cs.uiuc.edu/>から引用

図-2 GAIA プロジェクト

する例である。先にあげた杖が歩行中に老人に危険を知らせるなどもその例である。ユビキタス環境では、カーナビやヒューナビだけではなく、ビルの中や家の中のさ

まざまな状況でエージェント(やロボット)が人をサポートしてくれるであろう。そのための仕組みやアーキテクチャは、従来からスマートスペースの研究として行われ

てきた。さらに、エージェントの動作を人間が助けるという逆のパターンも考えられる。たとえば、エージェントがモノを管理している場合、人が管理しやすい場所(カメラの近くなど)にモノを移動させて、その管理を助けるなどである。エージェントは、コビキタス環境によってモノや人の正確な状況が把握できるため、一心同体の協力体制をとることが可能になる。これらの協調の良し悪しは、自律性の評価と同様、安全性の観点・そしてユーザビリティの観点から評価されるべきである。

スマートスペースでは、エージェントが人同士や人とモノの協調を仲介するシナリオが考えられる。たとえば、人同士の議論の場を設けるとか、議論を促進するようなモノの移動を行うようなシナリオである。無線センサネットワークの発展により人やモノの物理的な相対関係(位置、温度、加速度など)までもが正確に把握できるようになる。エージェントが人やモノの協調を仲介するときには、それらの物理上の関係だけではなく、現実社会でのそれぞれの関連・立場との整合性を考慮する必要がある。そのためには、エージェント間や現実社会の関連をモデル化し、一貫性をレビューしたり、ポリシー記述や形式的手法により無矛盾性をチェックしたりする方法が有効である。

エージェントのコビキタス環境への適応

エージェントの環境適応性とは、環境の変化を察知し、その環境での適切な振る舞いに切り替える能力のことを指す。コビキタスではない従来の環境では、環境として利用可能な情報や、エージェントが振る舞える範囲が限られていたため、切り替えにもバリエーションがなかった。エージェントは、コビキタス環境によって、環境の情報を詳細にモニタリングでき、操作できる機器も

コラム 2: コビキタス環境でのシームレスな協調

コラム 1 で紹介した Gaia では、場所ごとにアクティブスペースが存在し、エージェントは、アクティブスペース上のさまざまなサービスを使うことで、人と環境が協調できるようにする。

しかし、人間と環境とのインタラクションは特定の場所でのみ行うわけではなく、環境を移動しながら行う場合も考えられる。たとえば、プレゼン資料を使ったプレゼン、編集、整理は、**図-3**のように会議室、廊下、居室と場所を移動しながら行うことが考えられる。環境が変化した場合、利用すべき適切なデバイスが切り替わり、エージェントは、その場その場で適切なサー

ビスの切り替えを行わなくてはならない。

しかしながら、エージェントの内部動作と、状況に応じた適切なデバイスの選択、状況の変化に伴うデバイスの切り替え方法を同時に記述してしまうとエージェントの設計や変更が困難になってしまう。そこで、文献 3) では、それらの記述を分離する方法を提案している。エージェントの内部動作をワークフローとして記述し、その中で使うデバイスはパートナー定義として、デバイスを切り替える条件はバインディングポリシーとして、それぞれ別に定義する。この記述の分離によって、エージェントの基本動作部分の再利用性を高め、環境の変化へのデバイスの切り替え方法などがカスタマイズしやすくなる。

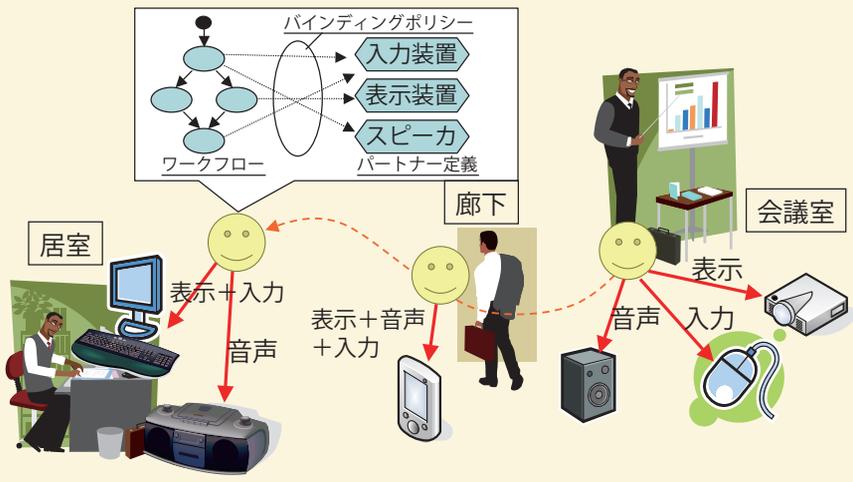


図-3 コビキタス環境での利用サービスの切り替え

増えるため、シームレスに環境に順応し、環境を活用した(context-awareな)サービスを提供できるようになる。Gaia(コラム1を参照)では、PDAで閲覧しながら会議室に入ると、そこにある複数のディスプレイに詳細情報を映し出し、PDAのほうはリモコンに変化するというシナリオ^{☆7}が紹介されている。Context-awareアプリケーションを構築するため仕組みは、Gaiaのアクティブスペースプログラミングやダブルスペースを使ったTOTAミドルウェア⁴⁾などさまざまな方式が提案されており、エージェントの構築に利用可能である(具体的な研究例は、**コラム2**に示す)。

☆7 将来的には、携帯電話を任天堂Wiiのリモコンのように使って、スマートスペースを操る日がくるかもしれない。

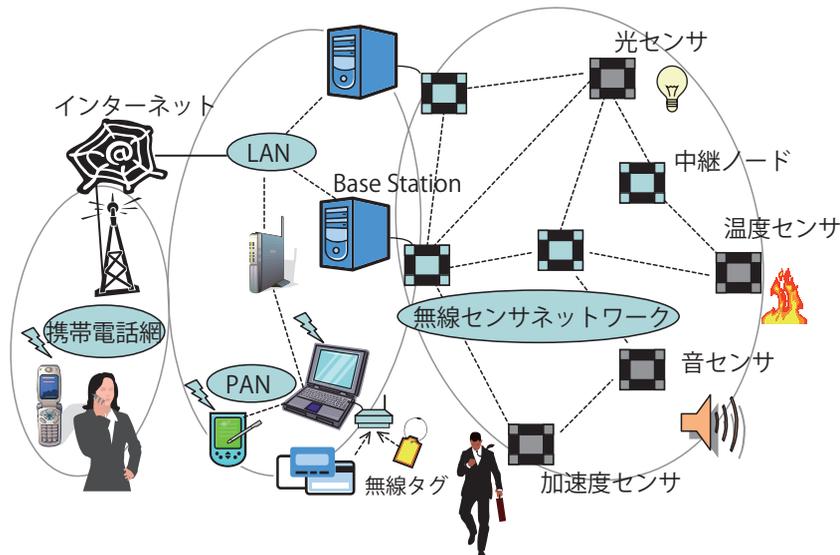


図-4 ユビキタス環境を支えるネットワーク網

これらの技術の評価は、サービスのユーザビリティやミドルウェアの反応速度、そして、ミドルウェアを使ってサービスを利用する際のエージェントの設計しやすさや、変更容易性の高さの観点で行う。ユーザビリティに関しては、画面や機器を切り替えるタイミングが適切かを実験により評価する必要がある。

モバイルエージェントが支えるユビキタス環境のインフラ

ユビキタス環境では、さまざまなデバイスがネットワークにつながっている(図-4)。その代表的なネットワークは、携帯電話網、LAN、PAN (Personal Area Network)、無線センサネットワーク、そして、インターネットである。PANは、近くに存在するデバイスを動的に相互接続するアドホックネットワークで、Bluetoothなど比較的微弱な電波が用いられる。無線センサネットワークは、温度、湿度、音、位置などのセンサ情報を非常に小さなデバイス(ノード)を通して収集するためのネットワークである(詳しくはコラム3を参照のこと)。

無線センサネットワークを使ってセンサ情報を収集する際には、そのノードの性質から、故障やバッテリー不足による機能停止、バッテリー残量、貧弱なリソースを考慮しなければならない。さらに、ノードの配置場所は、あらかじめ決められない場合も多く、設置された後にも、風や取り付けられたものの移動などによって、その位置が変化する可能性がある。

このような条件下でネットワークを構成しセンサ情報を収集するには、エージェントの移動性が有効になる。

コードの自律的移動が可能なモバイルエージェントにより、ネットワークの構成方法(ルーティングテーブルの作り方など)や情報の収集方法の動的変更ができるだけでなく、情報のフィルタリングを各ノードで行うことで通信量を抑えることができる。アドホックネットワークを構成するプロトコル^{☆8}や情報を収集する方法にはさまざまなバリエーションが考えられるが、それらは、システムやアプリケーションの特性によって最適なものが異なるため使い分けが必要となる。しかしながら、センサノードはメモリが少ないためさまざまなコードをあらかじめ組み込むことが難しく、さらに、一度配置したら回収が困難な場合が多い。たとえば、ノードが柱に埋め込まれたり、森に散布されたりした場合である。

Mote上のモバイルエージェントフレームワークには、Agilla^{☆9}などがある。Agillaでは、各エージェントが仮想的なスタックマシンでモデル化されており、それに対する操作を記述する。さらに、moveコマンドで移動が可能である。

モバイルエージェントによるセンサ情報の収集

無線センサネットワークから必要なセンサ情報を記述する方法は、大きく分けて、Impala, EnviroTrack, COMiSなどのイベントドリブンな記述方法と、Cougar, DFuse, TinyDB, TinyLIMEなどのデータドリブンな記述方法がある。

☆8 IETF (Internet Engineering Task Force) の MANET WG (<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>) で AODV や DSR などさまざまなプロトコルが検討されている。

☆9 Agilla: A Mobile Agent Middleware for Wireless Sensor Networks, <http://mobilab.wustl.edu/projects/agilla/>

コラム 3：無線センサネットワーク

温度、湿度、音、位置などセンサから収集できるデータをネットワーク経由でアプリケーションから利用可能にしたものをセンサネットワークという。温度、湿度のセンサ情報といえば、エアコンや冷蔵庫などの家電に取り付けられているが、その情報を LAN やインターネットで利用可能にするのが、センサネットワークである。近年では、無線タグから得られた情報もセンサ情報として活用されつつある。さらに、センサに無線機能を付け、近くにいるセンサ同士が通信し合うことでその場その場のネットワーク（アドホックネットワーク）を形成し、情報を無線で利用できるようにしたものが無線センサネットワークである（図-4）。

無線機能がついたセンサ（センサノード）は、小型でバッテリー駆動し、貧弱なマシンパワーであるが、低コストで作成でき、長時間の運用、動的な配置・移動を容易に行うことができる。また、個々が発生する電波は

非常に微弱で通信範囲は狭いが、通信を中継する機能を持つことで、バケツリレー式にセンサ情報をインターネットに接続するサーバに伝えることが可能である。

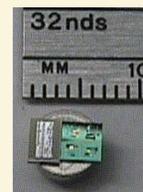
センサノードの例として、カリフォルニア大学バークレー校の SmartDust プロジェクト^{☆10} で生まれた Mote（微塵の意味）がある（図-5）。この Mote には TinyOS という OS が搭載され、NesC という言語を使ってプログラミング可能である。このプロジェクトで研究開発された Mote は、クロスボー^{☆11} から販売されている。また、インテルからも 3 センチ平方という超小型の Mote が発表されている。

無線センサネットワークは、有線のネットワークと違い、その配置が容易（空中散布や建物の中に埋め込み可能）なため、災害時の現場の状況把握、自然環境のモニタリングや室内のモニタリングなどへの応用が期待されている。また、人や荷物、車などに設置することで、ヘルスケア情報の収集、物流・運輸のトラッキングなどへも応用可能である。



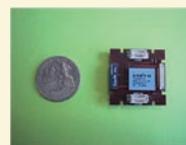
Crossbow MOTE

http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2002/08/05_sensor.html から引用



CMUが開発したMOTE

<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/> から引用



Intel MOTE

<http://www.intel.com/research/exploratory/motes.htm> から引用

図-5 さまざまな Mote

☆10 SMART DUST, <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
 ☆11 <http://www.xbow.jp/>

る。前者は、アプリケーションで関心のあるセンサの状態・条件（たとえば、居室にある温度センサが 26 度以上など）を指定する方法である。センサネットワーク上のミドルウェアは、条件が成り立ったときにアプリケーションに対してセンサ情報を知らせてくれる。後者のデータドリブンな方法では、センサネットワークを巨大な DB とみなして、SQL などの DB 言語でデータのクエリを指定する。たとえば、TinyDB では、4 階にある温度センサの 5 秒間隔の平均温度を知りたい場合、次のように記述する。そうすると、ミドルウェアは、クエリの記述に基づき、自動的に最適なノードでデータ収集と統合を行い、結果をアプリケーションに渡す。

```
SELECT AVG (temp) FROM sensors
WHERE floor=4 SAMPLE PERIOD 5s
```

データ収集、統合を行う最適なノードや、得たい情報の

条件や結果の通知方法は、アプリケーションごとに異なるため、それらを切り替えることができる仕組みが望まれる。そこで、情報の収集をモバイルエージェントにすることで、イベントドリブンな結果の通知や、最適なノードでのデータ収集・統合方法がカスタマイズ可能となる。

このようなことが実現可能なエージェントミドルウェアの 1 つとして、GEOBEE⁵⁾ がある。GEOBEE では、観測対象の領域（target zone）とともに、観測結果の統合とその通知方法、そして、エージェントが居るべき領域（expected zone）を指定する。その情報を持ったモバイルエージェントは、観測領域まで移動し、そこで観測、統合、通知を行うことで、情報収集に必要な通信量やリソース消費量を最小に保つことが可能である（図-6）。もし、ノードの移動や観測対象が移動した場合、最適

なエージェントの位置が変わる可能性がある。しかし、エージェントが頻繁にノードを移動するとそれだけノードのリソースを消費することになる。そこで、expected zone を外れた場合のみ、target zone に移動することで、リソースの消費を最小限に抑えることができる。

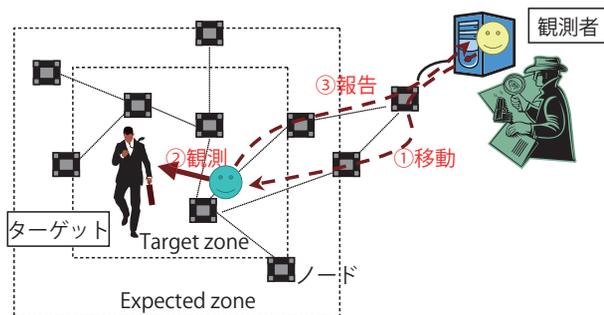


図-6 モバイルエージェントによるセンサ情報の収集

エージェントが作るユビキタス環境の電子社会

u-Japan 政策やユビキタスのサーベイ論文⁶⁾では、5年後から10年後のさまざまな未来的シナリオが紹介されている。これらの個々のシナリオは、ハードウェアがそろえば個々にエージェントを設計することで実現可能であろう。しかしながら、今後必要となるのは、このようなシナリオが実現可能な汎用的なソフトウェアアーキテクチャやミドルウェアの実現である。Web や SOA (サービス指向アーキテクチャ) の実現により、さまざまなサービスやデータを統一的に扱うことが可能となった。今後、エージェント社会のためのアーキテクチャが実現することで、ユビキタス環境のさまざまなサービスや物理情報を統一的に扱えるようになることが期待できる。

本稿では、ユビキタス環境でエージェントがどう発展するか、また、新たに登場した無線センサネットワークでエージェントがどう活躍できるかを説明した。無線センサネットワークでは、最適なネットワークを構築するために、また、中間層では、センサデータを効率よく収集するためにモバイルエージェントが有効である(図-7)。さらに、従来のエージェントの自律性、協調性、環境適応性は、ユビキタス環境によって向上させることが可能となる。

参考文献

- 1) 本位田真一, 飯島 正, 大須賀昭彦: エージェント技術, 共立出版 (1999).
- 2) Román, M. et al. : A Middleware Infrastructure for Active Spaces, IEEE Pervasive Computing, Vol.1, Issue 4, IEEE, pp.74-83 (2002).
- 3) 石川冬樹, 吉岡信和, 本位田真一: プロセス記述によるサービス合成のパーベイシブコンピューティングへの適用, 情報処理学会論文誌, Vol.48 No.4 (Apr. 2007). (掲載予定)
- 4) Mamei, M. and Zambonelli, F. : Programming Pervasive and Mobile Computing Applications with the TOTA Middleware, Proc. of PerCom'04, IEEE CS, pp.263-274 (2004).

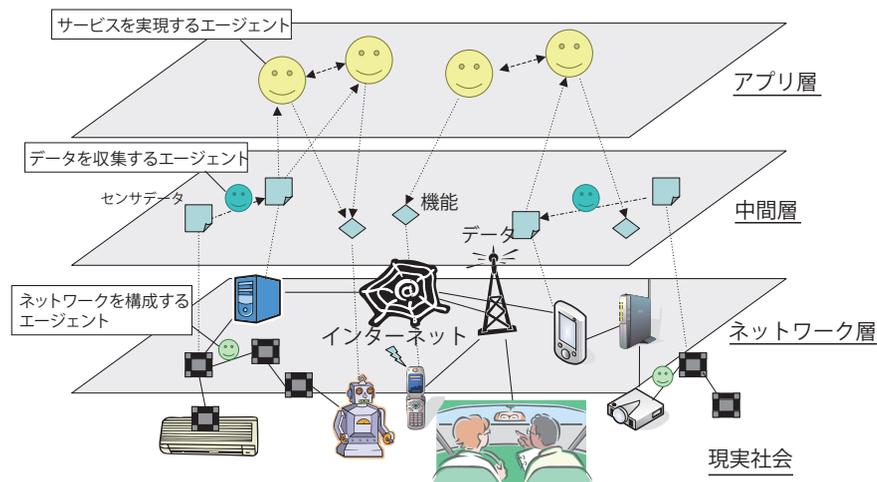


図-7 エージェントが支えるユビキタス社会

5) 鄭 顕志, 深澤良彰, 本位田真一: MANET における省資源性を考慮した位置依存情報収集手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-D, No.12, pp.2625-2636 (2006).

6) Satyanarayanan, M. : Pervasive Computing : Vision and Challenges, IEEE Personal Communications, pp.10-17 (2001).

(平成 19 年 1 月 26 日受付)

吉岡 信和 (正会員)

nobukazu@nii.ac.jp

1998 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。同年 (株) 東芝入社。2002 年より国立情報学研究所に勤務, 2004 年より同研究所 特任助教授, エージェント技術の研究, ソフトウェア工学の研究に従事。現在に至る。日本ソフトウェア科学会会員。

本位田真一 (正会員)

honiden@nii.ac.jp

1978 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。(株) 東芝を経て 2000 年より国立情報学研究所教授, 2004 年より同研究所アーキテクチャ科学研究系研究主幹を併任, 現在に至る。2001 年より東京大学大学院情報理工学系研究科教授を兼任, 現在に至る。2005 年度パリ第 6 大学招聘教授。早稲田大学客員教授。工学博士 (早稲田大学)。1986 年度情報処理学会論文賞受賞。日本ソフトウェア科学会理事, 情報処理学会理事を歴任。日本学術会議連携会員。本会フェロー。