

ユビキタスサービスとその技術課題

山崎 憲一

ユビキタスという言葉が頻繁に用いられているが、実際には、人によって意味するところがまったく異なるのが現状である。本稿では、ユビキタスサービスの概念を整理し、インジブル、コンテキストウェア、フィジカルという特性による定義を行う。これに基づき、ユビキタスサービスの大まかな機能抽出を行い、それら機能の要求条件と実現する上での技術的課題を、近年の研究例をいくつか示しながら解説する。

キーワード：ユビキタスコンピューティング、センサ、無線タグ、シームレスサービス

1. はじめに

「ユビキタス」という言葉が、頻繁に用いられるようになってから数年が経つ。この間、各種学会において関連研究会が設立されるなど、研究者の間には、徐々に「ユビキタス」に関するコンセンサスのようなものが形成されつつあるように思われる。とはいえ、その定義や要求条件、これを実現する上での技術課題等について、それほど定まっているとも言えないのが現状であり、本特集の中においてさえ、各記事における定義が完全に同じとは限らない。しかし、これはむしろ黎明期にある研究分野においては、当然の状況である。この解説では、多くの関連研究を広く概観することを念頭に置きつつも、我々なりの定義に沿った形で説明を進めることで、最終的に目指すシステムに対する各研究の位置付けを明らかにするように心がけた。したがって、「ユビキタス」関連の研究全体を網羅するものではない。また、逆に特集内の他の記事と重複する部分もあるかと思われるが、一つの記事としての自己完結性を重視したためであり、この点をご了承頂きたい。また、本稿では、あえてキーワードだけを示し、内容にはあまり立ち入らない記述をしている箇所も多々ある。WWWの検索エンジンに入力すれば、十分範囲を絞れるようなキーワードを挙げたつもりなので、興味のある方はお試し頂きたい。

2. シームレスとユビキタス

周知のように「ユビキタスコンピューティング」の提唱者は、Weiser[1]である。ユビキタスコンピュー

ティングは、直訳的に解釈すれば、偏在する計算機に支えられたある種の環境である（むろん、彼はそれ以上の意味をこめてこの言葉を用いている）。以降では、このような環境によって実現されるサービスをユビキタスサービスと呼ぶ。ユビキタスサービスとWeiserの考えるサービスとは、必ずしも同じものではなく、本稿独自の定義である。

我々は、広く用いられている「ユビキタス」の中には、大きく二つのコンセプトがあると考えており、この区別からユビキタスサービスの明確化を始めたい。

一つは、ユーザがどこにいても同じように継ぎ目なくあるサービスを受け続けられるというコンセプトである。本稿では、これをシームレス（継ぎ目のない）サービスと呼ぶ。一方、極めて多くの端末が高い分散度で物理世界に遍在しているときに、これら端末を情報取得や情報提供に用いることによって提供されるサービスを（狭義の）ユビキタスサービスと呼ぶ。

シームレスとユビキタスについて、対象とする端末の多様性と端末の大きさ（機能的粒度）により分類し

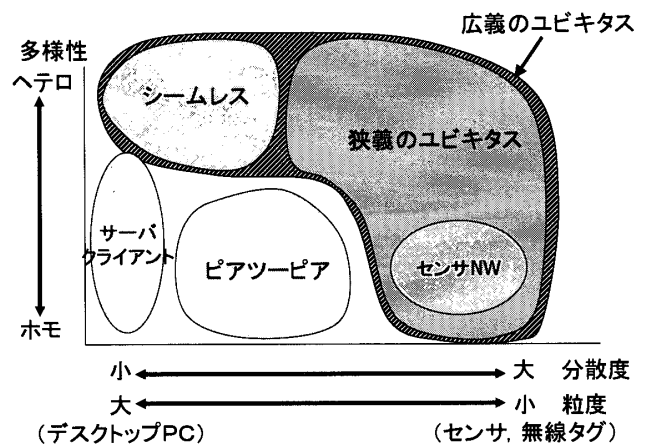


図1 ユビキタスとシームレスの分類

やまざき けんいち

(株) NTT ドコモ

〒239-8536 横須賀市光の丘3-5

たものを図1に示す。

シームレスサービスのコンセプトでは、比較的少数の端末を対象として、それらの多様性から生じる問題を扱う。例えば、PCでも携帯電話でも、あるいは有線・無線を問わず、いつでもどこでも同じサービスが受けられることを指す。ここでは、端末、アクセス手段の多様性という、サービス提供におけるある種の「継ぎ目（シーム）」をなくすことがポイントである。

一方、(狭義の) ユビキタスサービスにおいては、通信端末、あるいは通常の通信端末よりも機能的に単純なものを含むあらゆるノードが、極めて多数存在することが一つの本質となる。同じ温度センサが多数配置されたセンサネットワークが一例である。ノードは、例えば、温度センサ、湿度センサ、無線タグなど、ある特定の限られた機能だけをもつため、これらが集まったトータルな環境下においてヘテロジニアスな状態が形成される。

Weiser は、インターネットによる分散コンピューティングは移行期にすぎず、その次にユビキタスコンピューティングの時代が訪れるとしている[2]。この見方に従えば、シームレスは、この移行期において、その利用環境の利便性向上を目指す。その先に来たるユビキタスコンピューティングの時代には、ここに述べた(狭義の) ユビキタスサービスが提供されることになる。これら二つのコンセプトを合わせて(広義の) ユビキタスと考えることもできるが、以降では狭義のユビキタスサービスを主に議論し、単にユビキタスといった場合はこちらを指すものとする。

3. ユビキタスサービスの特徴とモデル

(狭義の) ユビキタスサービスと類似の考え方は、既に多く提案されているが、ここでは次の三つの特質を供えるサービスをユビキタスサービスと呼ぶ。

- (1) ユーザの状況や意図などに応じたサービスを受けられる：ユーザにサービスを提供する主体(仮にシステムと呼ぶ)は、状況や意図を理解し、画一的なサービスでなく、その場にあわせたサービスを提供する。これは、context awareness と呼ばれる考え方である。
- (2) いわゆるサイバー世界の情報だけでなく、物理的なモノや事象をも対象とする：システムは、いたるところに存在し、物理世界を認識し、また物理世界を制御できる。これは、imbedded (あるいは embedded) computing とも呼ばれる。

- (3) ユーザが意識することなくサービスを受けられる：ユーザが明示的な要求をしなくとも、自然にサービスが提供される。これは、invisible service あるいは disappearing computer といったキーワードで説明されることもある。

以降では、これら三つの特性をコンテキストウェア、フィジカル、インビジブルと呼ぶ。これらは、厳密には、互いに直交するものではないが、ユビキタスサービスの供えるべき必須の特性であると考えられる。

これらの特性について、図2を用いてさらに説明する。ユーザは、意図あるいは要求をもつ。時には、ユーザ自身がその要求を意識していない場合もある。ユーザ近くの物理的状態や、ユーザのこれまでの経験・経緯は、ユーザの要求に影響を与える。この影響を与える事柄をまとめてコンテキストと呼ぶ。コンテキストの周りには、物理世界が広がる。物理世界にはユーザに直接は関係のないさまざまなモノや事象が存在する。一方、ユーザに何らかのサービスを提供する主体は、物理世界とは別の空間に存在すると考える方が、現状のさまざまな情報サービスとの対比上都合がよい。この空間を、ここではサイバー空間と呼ぼう。最後にサイバー空間と物理世界の間で、情報を運ぶ仕組みが存在する。これには、物理世界から情報を取得するセンサや、物理世界に影響を与えるアクチュエータなども含まれるが、これらを含めてネットワークと呼ぶ。

これを用いて前述の三つの特性を考えてみよう。従来の情報サービスは、ユーザが自分の要求を(多くの場合、パソコンの前に座って)サイバー空間に提示し、サービスを受ける。ここでは、ユーザの置かれるコンテキストも物理世界も、サービスに関らない(コンテキストはユーザに間接的に影響を与えるが、ユーザの要求提示のみがサービスを決める)。

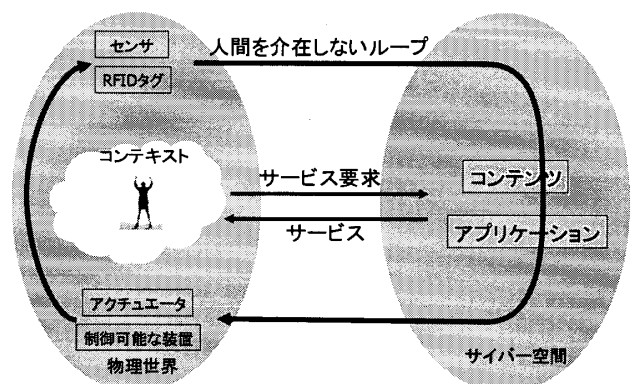


図2 ユビキタスサービスの提供モデル

このようなサービス形態に、ユーザのコンテキストを加える。ユーザは、自分の要求を提示するが、同時にサイバー空間は、コンテキストの状態を取得する。サイバー空間は、要求に基づきサービスを提供するが、この際コンテキストに応じてサービスを適応させる。これがコンテキストウェアの考え方である。例えば、会議の時間が近づくと知らせてくれる電子秘書が、ユーザが会議室に向かおうとしていることを状況から理解できたなら、リマインドを送る必要はない。このようにコンテキストウェアな電子秘書により、ユーザは無意味なリマインドを受けずにすむ。

コンテキストは、多くの場合、時空間的にユーザの近傍の状態である。一方、ユーザの周りには物理世界が広がる。近傍だけでなく、物理世界全体がサービスの要求元となりサービス提供対象となると考えることもできる。これによりフィジカル特性が生じる。ユーザの概念が広がったことにより、例えばテレメタリングや、遠隔家電制御などへとサービスが広がる。

ここで重要なことは、実環境にサービスが提供された結果として、実環境が変化するという点である。コンテキストの変化や、実環境での新たな事象の発生により、暗黙のうちにサービスが要求され、ループとなる（これは Proactive Computing[3]に類似の考え方である）。ユーザは、このループからメリットだけを享受する。このようにユーザが明示的に指示せずとも、いつでもどこでもサービスによるメリットを受け続けられることがインビジブルという特性である。

4. ユビキタスサービスを支える技術

本節では、節3に述べたユビキタスサービスを実現するための要求条件と技術課題について概観する。ユビキタスサービスを提供するシステム全体の技術課題をとらえるため、図2に示したモデルをより詳細化し、情報フローに沿って機能を図式化すると図3のようになる。後述するように、このように単純に機能を取り出すことは問題もあるが、第一次近似としては十分であろう。

フローは、実環境の状態がセンサなどによって取得されることから始まる。これを環境情報取得機能と呼ぶ。次に、これらの情報をもとに、実環境の状態を理解し、環境モデルをサイバー空間中に構築する。環境モデルをもとに、その状況において、誰にどのようなサービスを提供することが望ましいのかを決定する。ここまでの一連の過程を環境理解型サービス決定機能

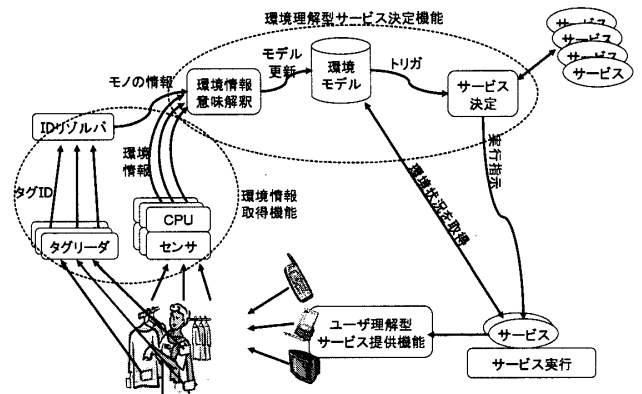


図3 ユビキタスサービスの情報フローと機能

と呼ぶ。図では環境の理解とサービス決定が異なる機能のように示されているが、両者は密接な関係にあり、ここではこれらをまとめて一連の機能とみなす。サービスが決定すれば、後は提供するだけというのが通常の提供形態であろう。しかし、後述するように、ユーザが（多くの場合はパソコンの前に座り）明示的にサービスを求め、それに対してサービスを提供するという形態を取らないユビキタスサービスにおいては、従来にない課題が発生する。これを解決しながら、サービスが自然な形でユーザに到達することを制御する機能が必要である。ここでは、これをユーザー理解型サービス提供機能と呼ぶ。

以下では、これら三つの機能とその技術課題に触れるが、それぞれについて網羅することは、紙面の都合上困難であり、特徴的な部分にのみ焦点をあてる。

4.1 環境情報取得機能

環境情報を取得することは、ユビキタスサービスの要であり、フィジカルという特性に最も関連する部分である。環境情報として取得される情報を大きく分類すると、(1)空間的な位置、方位、温度、湿度など、単純な情報であり、それ自身である程度の意味をもつもの、(2)動画像や音響・音声など、情報量が多く、ある程度の処理を行わないと情報から意味を得られないもの、(3)無線タグにより取得されるID情報のように、情報の形態としては単純であるが、ID識別という高度な意味をもつものがあろう。

この機能について最もベーシックな要求条件は、より精度の高い情報を取得することである。個々の情報について、物理的なセンサの精度を上げるためのハードウェア技術（ここでの精度には、例えば、無線タグIDをできるだけ確実に読むことなども含む）、従来からのセンシング技術、分類2の情報取得のための例え

ば画像処理技術などの進展は当然必要となる。これに加えて、近年の関連研究の一つのトレンド[4]は、Smart Dust に代表される、プロセッサと無線通信機能付きの超小型センサの研究である。これらの研究の多くは、次に述べるように、プロセッサによる情報処理能力をリソーススケジューリングといったシステムの安定した長期運用のために用いている。しかし、情報処理能力を、より有用な環境情報を取得するために使うことも考えられる。例えば、通常のアクティブ無線タグは定期的にしか信号を発しないが、振動センサと組み合わせてモノが移動中のときだけ信号頻度を上げれば、よりリアルタイムにタグの存在を把握できるし、同時に現在移動中であるということを信号に載せることもできる。さらには、モノ同士が互いの振動パターンが同じことを自ら判断し、同じ人や同じ車に運ばれているらしいことも分かる。これは、センサに近い部分で意味的な情報処理が行われ、直ちに高度な意味をもつ情報が得られるという意味で、分類(4)とも言うべき新しい環境情報である。

システムへの要求条件としては、いつでもどこでも、安定して情報を取得できることが求められる。実世界全体に配置されるセンサ類は膨大な量になることが予想され、この要求条件を満たすためには、克服すべき多くの技術課題がある。特に、分類(4)のような情報取得については、いわゆるセンサネットワーク関連の研究が必要である。文献[5]では、故障耐性、スケーラビリティ、ネットワークング、ハードウェアとエネルギーの制約などが課題として挙げられ、この課題を分散的に解くために、情報処理能力をもつセンサの研究がなされている。

ここで重要なのは、センサネットワークは、インターネットのような、あらゆる情報を流すための汎用的なネットワークではなく、センサ情報を流すために存在するということである。例えば、IPアドレスのようなグローバルな識別子や任意のノード間の到達可能性が必要なかを明らかにすることも含めて研究課題である。これらを考える上で、上の情報取得の分類は重要である。情報の意味を解釈するのは、次の意味解釈部の役割ではあるが、その情報が期待する処理の重さや情報の利用方法により、環境情報取得機能の実現形態は大きく異なり、ネットワークングの方法も異なる。それらを考慮せずに、ネットワークだけを構築することには意味がない。これらに関しては、In-network processing,あるいはdata-centered routing

と呼ばれる方向が興味深い。

4.2 環境理解型サービス決定

環境理解型サービス決定機能は、従来、コンテキストウェアと呼ばれるコンセプトに最も近い。コンテキストウェアにも、定まった定義があるわけでないが、誤解をおそれずに言えば、中心となるユーザが想定されており、そのユーザからの時空間的な距離が近い範囲での状態に着目している研究が多い。

一方、環境理解型のサービス決定においては、必ずしも中心となるユーザを想定せず、得られた環境情報すべてが対象となる。理想的には実世界のすべての状況を理解し、サービスを決定する。例えるなら、日本中で1000人の人が集まっているところはどこかという問いにも答えられるのが、環境理解型サービス決定であり、自分が今参加しているイベントに1000人の人がいるかという問いに答えられるのがコンテキストウェアである。

コンテキストウェア研究では、ユーザが中心であるため、位置依存型サービスに関する研究が多く見られる。確かに、空間的な位置が分かれば、人間がやりたいこと、やるべきことが相当程度定まるのは事実であるが、これで十分なわけではない。例えば、落としものや忘れものはどこでもする可能性があるし、喫茶店が緊急の仕事場になることもある。また、モノが中心となるサービス、例えば、冷凍食品の流過程での保管温度表示サービスなどもありうる。

位置だけでなく、環境全体のモデルを作ることには、多くの技術課題がある。例えば、実環境に何が置かれているのかを知るためには、従来のアプローチでは、画像認識などにより、人間が理解するのと同じように環境を理解するという手法が基本であったが、この実現は容易ではない。しかし、一つの可能性として、無線タグが大きな助けとなる。無線タグには、128ビット程度の情報しか格納できないが、世の中のあらゆるモノや場所にIDを付けるには十分である。ネットワークにつながったデータベースとあわせて利用すれば、モノの情報を自由に取得できる。ただし、モノの向きなど画像認識でなければ理解できないことがあるから、併用も考慮する必要があるが、いずれにせよIDを容易に取得できるという特性は、環境理解のブレークスルーとなる可能性がある。これが、前節の分類で(3)を特別扱いした理由である。

環境モデルをサイバー空間の中に作るには、取得した環境情報を計算機の理解できる形式に変換する必要

がある。この形式の抽象度が高ければ高いほど、環境をより高いレベルで理解したということになる。これらに関する研究はまだあまり多くなく、例えば、無線タグが張り付いているモノの情報を記述する技術（旧 AutoID Center の Product Markup Language など）を用いれば、モノの所有者や場所などを記述することができるが、流通などでの利用を想定した記述にとどまっている。また、コンテキストウェア系の研究には、より複雑な記述が可能なものもあるが[6]、それらにおいても、何をどう変換するかをアプリケーションごとに指示する必要がある（むしろ、ユーザが自由にコンテキストを定義可能であることが研究の主眼となっているものが多い）、環境全体を自動的にモデル化するには、到底至っていない。

次に、環境が理解できたとして、その状況にあったサービスを選ぶ、ないしはサービスを適応的に変化させる必要がある。このためには、その状況でのユーザの要求が何なのかを決めることと、要求にあったサービスを発見ないしは作り出す機能が必要である。前者は極めて難しい課題であり、前述のように、コンテキストウェア関連研究として、位置にひも付けられたサービスを提供する等の研究は見られるものの、十分な研究がなされているとは言えない。一方、後者の要求をもとにサービスを探し出す仕組みとしては、Jini、UDDI などの実用技術、新たに作り出す技術については、例えば文献[7]などの研究がある。

4.3 ユーザ理解型サービス提供機能

提供することが決定されたサービスを、きちんとユーザに届けるためには、ユビキタスサービス独自の次のような要求条件を満たす必要がある。

第一に多様かつ広域に偏在するデバイスからなる環境において、サービスを提供しなければならない。PDA、携帯電話、プリンタ、情報家電などの据え置き機器、あるいはヘッドマウントディスプレイや電子ペーパーなど、将来的には、多様なデバイスが身の回りに広がるであろう。このような環境の中を、ユーザは移動していくわけであり、その時々最適なデバイスを選びながら、サービスを提供していく必要がある。これらを統合的に管理・利用することに関する研究は、節1で分類したシームレスサービス環境に近い研究であり、本解説ではこれ以上述べない。

次に、節3で述べた特性「インビジブル」に起因する要求条件がある。ユビキタスサービスにおいては、コンテキストや物理世界の変化により、暗黙のうちに

サービスが要求され、ユーザに提供される。ユーザから見れば、明示的な要求をしていないのに、サービスが提供されることになる（むしろ、過去にそのサービスを受ける契約などを行っていることは前提である）。例えば、忘れものを教えるサービスでは、ユーザが予期していないときに情報が通知される。このようなことは、例えば WWW 上で提供される通常のサービスには見られない。ユーザが待ち受けていない情報をユーザに確実に届けるには、現状であれば、例えば携帯電話の着信音を鳴らし、確実に読んだことを示すためメールを送り返してもらうなどの手法が考えられよう。しかし、その人にとって、どんな手間をかける価値があると分かっているサービスならともかく、そうでないサービスも多々ある。例えば、前述の会議通知サービスは、重要なときもあるしそうでないときもある。このような問題を解決し、ユーザの邪魔をしないようにしながら、ユビキタスサービスを提供していくことが必要である。この問題の解決には、ユビキタスコンピューティング自身が助けとなる。つまり、環境情報取得機能が、ユーザの行動などを高精度で得る手段をも提供してくれるのである。例えば、環境情報から、ユーザがあるタスクに集中していることが分かったら、重要でないメッセージは、後で届けるようにする。このように、人間の行動[8]やサービス認知[9]に関する研究が必須となる。これがこの機構を「ユーザ理解型」と呼ぶ理由である。

最後に、暗黙のうちにバックグラウンドで起動されるサービスの数や種類が多いことに起因する要求条件がある。例えば、あるユーザは、セキュリティ会社の落としもの通知サービスに有料で加入することもあるだろうし、高額なものにはメーカーが無料で落としもの通知サービスを提供するかもしれない。あるいは、落としものをしたと同時に、類似品を最も近くで売っている店の宣伝が届くかもしれない。しかし、同時に同じサービス三つは不要である。解決には、そのサービスが何であって、ユーザにどのようなメリットを与えるのかを理解した上で、サービス間の交通整理をする機能が必要である。

これら三つの要求条件を、一つの制御としてまとめたのは、それぞれが相互に関連しているからである。例えば、携帯電話よりも大画面ディスプレイの方が、ユーザは多くのサービスを同時に認知できるから、交通整理の方法も異なる。Ubicomp (Ubiquitous computing) 環境は、多くのサービスが、限られた人

間の認知量と限られたデバイスを奪いあう ubiquitous competition 環境でもある。デバイス環境, 人間, サービス内容をすべて理解した上で, さまざまな競合を統合的に解消する技術が求められる。

この節の冒頭で述べたように, この三つの機能の分類は, 実は単純過ぎる。まず, 図3のフローでは, このフローがいつ流れ始めるのかを定義していない。時間は連続的であり, このフローには始まりも終わりもないはずである。また, 機能間を明確に分け過ぎていることも問題である。ここでは, それぞれの機能を完全無欠なブラックボックスとして扱っている。しかし, 例えば, ある部屋の明りをつけるというサービスを実行したが, 明かりセンサの出力が上がらなかったでしょう。これにはさまざまな原因が考えられる。例えば, 部屋の模様替えがあったのかもしれないし, 電灯かセンサが故障したのかもしれない。環境モデル(部屋のモデルや機器のモデル)を修正したり, システムからそのセンサを切り離したりといったことが必要になる。さらに, 人間という曖昧性のある要素が系に含まれると事態は一層難しくなる。系全体を統合的に考えて判断していくことが求められる。近年のロボット研究には, 完全なモデルというものを期待せず, 実環境と相互作用する中で初めて動作が決まっていくといったアーキテクチャの研究が見られる[10]。同じことが, ユビキタスサービスについても言える。この意味で, 図3そのものが研究対象である。

このほかにも, ここでは触れられなかった技術課題は多々ある。その中でも最も重要なものは, プライバシである。コンテキストは極めてセンシティブなプライバシーである。これを守る技術は必須だが, 守るだけでなく公開することについても適切な制御をし, 結果としてユーザがメリットを受けるような仕組みを考えていく必要がある。

5. おわりに

本稿では, ユビキタスサービスの概念を整理し, 一つの新たな定義を試みた。これに基づき, サービスの特性を抽出し, それらを実現するための技術的課題を示した。ユビキタスサービス提供のためには, 極めて多様な要素技術が求められ, 必然的に研究課題も多岐

にわたる。残念ながら, これらすべてについて, 最新の知見をお伝えすることは, 筆者の手に余ることであり, 表層的な記述に終始したことをお許し頂きたい。

ユビキタスコンピューティング/サービスの概念自体も, これからの学術研究やビジネスの場でのさまざまな議論により変化していくであろうが, いずれにせよ, 広い意味での通信サービス基盤として, 今後発展が大いに期待されている分野であり, 研究のさらなる進展が望まれる。

参考文献

- [1] M. Weiser: "Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing", *Comm. of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 75-84, 1993.
- [2] M. Weiser and J. S. Brown: "The Coming Age of Calm Technology", revised version of M. Weiser and J. S. Brown: "Designing Calm Technology", *Power-Grid Journal*, vol. 1.01, 1996.
- [3] D. Tennenhouse: "Proactive Computing", *Comm. of the ACM*, Vol. 43, No. 5, pp. 43-50, 2000.
- [4] D. Estrin, D. Culler, K. Pister, and G. Sukhatme: "Connecting the Physical World with Pervasive Networks", *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 1, No. 1, pp. 59-69, 2002.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci: "A survey on Sensor Networks", *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-114, 2002.
- [6] S. S. Yau, F. Karim, Y. Wang, B. Wang, and S. K. S. Gupta: "Reconfigurable Context-Sensitive Middleware for Pervasive Computing", *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 33-40, 2002.
- [7] 南, 杉田, 森川, 青山: "ユビキタス環境に向けたインターネットアプリケーションプラットフォーム", *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J 85-B, No. 12, pp. 2313-2330, 2002.
- [8] G. D. Abowd, E. D. Mynatt, and T. Rodden: "The Human Experience", *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 1, No. 1, pp. 48-57, 2002.
- [9] R. Vertegaal: "Attentive User Interface", *Comm. of the ACM*, Vol. 46, No. 3, pp. 30-33 (特集全体は pp. 30-72), 2003.
- [10] 石黒: "知能ロボットへの構成論的アプローチ", *情報処理*, Vol. 44, No. 11, pp. 1118-1122, 2003.