

ユビキタス環境に向けた実世界指向ネットワークングテストベッド

川原 圭博[†] 南 正輝[†] 森川 博之^{††} 青山 友紀[†]

[†] 東京大学 大学院情報理工学系研究科

^{††} 東京大学 大学院新領域創成科学研究科

E-mail: †{kawahara,minami,mori,aoyama}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 来るべきユビキタスコンピューティング環境においては、ネットワーク化された機器や多種多様なコンテキスト情報を使って緻密で質の高いサービスがネットワーク上で提供されると期待されている。しかしながら、そのようなアプリケーションを現実のものとするためには、依然として多くの課題が残されている。筆者らはそのような課題の中で、我々の生活している実世界とインターネット上の仮想世界を密に融合させてアプリケーションを構築できる枠組みの実現がきわめて重要であると考えている。本稿では、そのような融合を実現するための統一的なテストベッドの構成とその要素技術に関して現在の取り組みを述べる。

A Real-world Oriented Networking Testbed for Ubiquitous Computing Environment

Yoshihiro KAWAHARA[†], Masateru MINAMI[†], Hiroyuki MORIKAWA^{††}, and Tomonori AOYAMA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{††} Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

E-mail: †{kawahara,minami,mori,aoyama}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract Ubiquitous computing environment will bring us “smart” and “attentive” application services using diverse users’ context and various networked devices including sensors and appliances. However, a variety of technical challenges are offered for the realization of such kinds of applications. Above all, we believe that the most important challenge is how we harmonize the physical world we live in and the virtual world on the Internet. In this paper, we present a design and technical challenges that are required for harmonizing real world and virtual world.

1. はじめに

絶え間ない電子デバイスの性能向上により計算機資源の小型化・高性能化は着実に進んでいる。Mark Weiserの予言どおりコンピュータ資源が深く人々の生活に浸透し、普段の生活の中でコンピュータを使っているという意識を持たなくなる時代もそう遠くないと考えられる [1]。

Weiser は [1] の中でユビキタスコンピューティング環境における数々のアプリケーションシナリオを語っている:

Sal の目覚め: Sal はコーヒーの香りとともに目を覚ます。数分前、寝返りの具合からして彼

女がもうじき目覚めることを目覚まし時計が察知し、「コーヒーはいかが?」とそっと尋ねておいてあったのだ ...

インターネットや WWW, そして数々の無線通信技術が、いつでも、どこでも、誰でも各種の情報にアクセスする経験をもたらすものであったとすれば、このユビキタスコンピューティング環境が目指すものは、実世界中に遍在する機器や多種多様なコンテキスト情報を使った緻密で質の高い、いまだけ、ここだけの経験を与えてくれるような気の利いた環境の実現である。

この Weiser の示したビジョンを実現するためには「遍在」「連携」「融合」という 3 つのキーワードを中心とする研究開発が必要不可欠であると我々は考えて

いる。生活環境の中に、多種多様なコンピュータ資源、ネットワークへの接続、そしてコンテンツが遍在していることはユビキタスコンピューティング環境の実現にとって必須であり、前提でもある。そして遍在するオブジェクトやサービス同士がネットワークを通じてお互いに連携することで単体ではなし得なかったサービスを合成することが可能となる。インターネット上に分散するサービスコンポーネントを動的に結合するWebサービスのような仕組みは、この連携を実現するための時代的な流れのひとつである。しかしここで注意すべきこととしては、これまでのインターネット上におけるサービスは、たとえばWWWなど、仮想空間上で提供されるものが中心であったということである。これに対して、ユビキタスコンピューティング環境は、いかなるサービスも物理世界中の人や物の状態、そして時間的、空間的な関係性を強く意識して提供される、すなわち仮想世界と物理世界の緊密な融合が必要になるのである。

現在我々は、センサやアクチュエータを含むトランスデューサを中心とした、実世界と仮想世界の融合を目指すための実空間指向ネットワークングテストベッドを核とした研究開発を行っている。本稿ではそのような融合を実現するためのアーキテクチャとその要素技術について、現在の我々の取り組みを踏まえて報告する。

2. 実世界指向ネットワークングと技術課題

第1.節に述べたとおり、ユビキタスコンピューティング環境の最大の特徴は、実世界に存在するハードウェア、仮想世界に存在するソフトウェアを含めた、あらゆるオブジェクトがネットワーク接続され、それらの有機的なつながりによって、利用者の好みや状況に応じたサービスの実現が可能となる点にある。実世界と仮想世界が融合した環境におけるサービスとしては、たとえばセンサネットワークから得られた物理的な状況に応じて適切な情報をユーザに提供するようなサービスなどがある。また、単に物理空間の情報取得して利用するだけでなく、交通やエネルギーなどを制御する大規模環境制御サービスのように、仮想世界で処理された情報を元に、アクチュエータを介して実世界に影響を与えるようなサービスも考えられる。そのようなアプリケーションを実現するためには、現在のインターネットが提供する枠組みだけでは不十分であり、実世界からの情報をセンシングして仮想世界に取り込む機能やアクチュエータなどの実世界のオブジェクトを仮想世界から制御する機能が新たに必要となる。

これに向けては、実世界のオブジェクトがハードウ

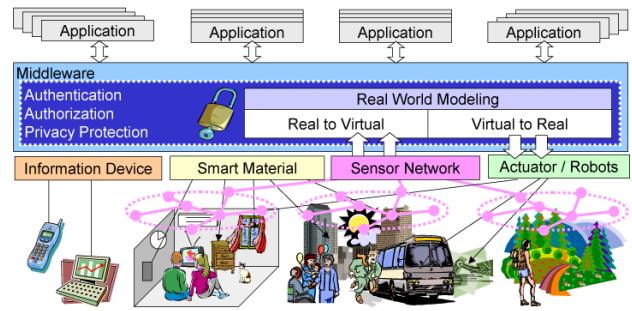


図1 実世界指向ネットワークングアーキテクチャ

エータ的な性質を持つということから、これまでのようにソフトウェアのみのアプローチでは不十分であり、基盤となるハードウェアとソフトウェア双方をバランスよくデザインしていかなければならない。また、ユビキタスネットワーク社会におけるアプリケーションが既存のアプリケーションと決定的に差別化できることを示すためには、プロトタイプアプリケーションを実装し、実際に使用しながらその有用性を示す必要がある。これまでの多くの研究開発では、技術的な側面が重要視され、そのアプリケーションの可能性を示すことは軽視されがちであった。しかしながらユビキタスネットワーク社会のキラアアプリケーションの姿が未だ明確に見えない現在においては、技術の可能性を示せるようなプロトタイプアプリケーションの開発も極めて重要な技術課題である。また、プロトタイプアプリケーションの実証実験を通じて、アーキテクチャをより洗練していく必要もあろう。

図1に我々の目指す実世界ネットワークングテストベッドの概要を示す。

以下では、実世界指向ネットワークングテストベッドに関して、ハードウェア/ソフトウェア双方の観点からいくつかの技術課題と現在の取り組みについて述べる。

3. ハードウェア関連技術

3.1 センサネットワーク

実世界と仮想世界の融合を図る上において、実空間の情報をいかにしてネットワークに取り込むかは極めて重要である。これに向けてはセンサネットワークが重要な役割を果たすと考えられる。これまで、国内外のセンサネットワークの研究は、軍事目的や自然科学分野をターゲットとし、ノードの電力消費や通信データ量を抑えるための手法などが研究されてきた[2], [3]。しかしながら、ユビキタスコンピューティング環境における民生利用という観点からセンサネットワークアーキテクチャを捉えている研究は数少ない。今後、セン

サネットワークを実世界で利用していく際には、センサノードをどのようなハードウェア機能で実現し、どのように実世界に浸透させるかといった点を含め、総合的な観点からのデザインが重要になる。

また、ネットワークから提供される情報を実世界中にいかにか効果的に表示するかに関しても同様に重要な問題となる [4] ~ [6]。

我々はネットワーク接続可能な小型トランスデューサを実世界指向ネットワークテストベッド実現の中核的ハードウェアとして位置づけ研究開発を行っている。小型トランスデューサは物理世界と仮想世界をつなぐインターフェースとしての役割を果たすことを想定し、実世界環境中のさまざまな物理現象や人や物の空間的な位置、物理的な状態を能動的にセンシングする機能が求められるほか、仮想空間中のアプリケーションやサービスからの出力情報を、音や光、動きなどといった形で物理世界にフィードバックする機構が求められると考えられる。

3.1.1 センサノード U³

我々は現在のところ、物理世界の情報を収集するためのデバイスとして小型センサノード U³ を開発している [7]。

センサネットワークのテストベッド構築に関する既存研究としては、WINS, SCADDS, WEBS などのプロジェクトにおいて低コストで微小な開発用センサモジュールの実現を目指して行われてきた [8] ~ [10]。現在では WEBS プロジェクト内の NEST で開発された MICA Mote がテストベッドとして主流になりつつある [11], [12]。その主な理由としては、MICA Mote が高機能でありながら市販部品を利用した低コストなデバイスで構成されており、さらに積極的に商用販売されていることによる。しかしながら、バッテリー機能、計算機能 (CPU)、無線通信機能などが 1-board で実装されており、アプリケーションに応じた機能の拡張を行うことは難しい^(注1)。

このような観点から我々は、多様なアプリケーション構築を支援し得る開発用モジュール U³ (U-cube) の設計と実装を行った。U³ は開発の汎用性や利便性に鑑み、既存の開発用モジュールである MICA Mote 等との互換性も意識して設計されている。U³ は 50mm × 50mm × 50mm の立方体内に電源ボード、CPU ボード、無線通信ボード、およびセンサボードの 4 枚の機能ボードを搭載しており、それぞれはバスコネクタで

(注1): そのほか、MICA Mote はノード間の無線通信に 900MHz 帯を利用するが、この周波数帯は日本国内では電波法の規制により出力が厳しく制限されており十分な到達距離を出せず (実効伝播距離: 数 10cm)、実用的なアプリケーションの実現が難しい。

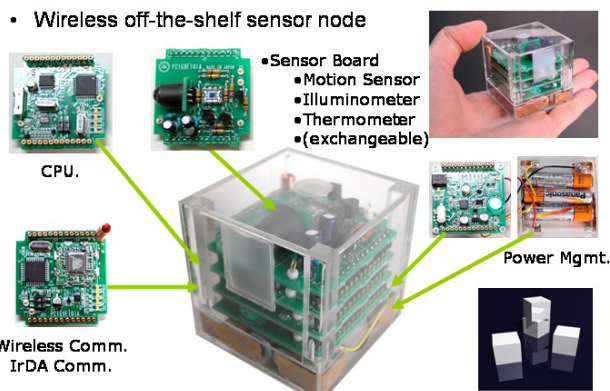


図 2 U³ センサノード

組み合わされている (図 2)。通信機能としてはノード間通信に 315MHz 帯 RF 無線モジュールを用いて最高 115.2kbps で通信が可能になっているほか、IrDA 1.0 により、センサノードと PC や PDA が直接通信できるようになっている。センサボードには多様なセンサ接続のための拡張バスが提供されており、アプリケーションに応じた機能の拡張が可能になっている。現在のところ U³ は MICA との無線レベルでの互換性は無いが、PC 等をゲートウェイとして、メッセージレベルで相互に通信することは可能である。また、無線通信モジュールには無線通信を制御するための専用 CPU として Microchip 社の PIC18F452(20MHz) を搭載している。無線通信における符号化処理や MAC プロトコルなどはこの CPU を用いてアプリケーションとは独立に実装することができる。

また、U³ のソフトウェアとしては実行環境と開発環境を提供している。それらは、アプリケーションの制御を行うアプリケーション用ソフトウェアと他ノードとの無線通信を行う無線通信用ソフトウェア、およびプログラム開発を行うための開発用ソフトウェアから構成されている。アプリケーション用ソフトウェアではハードウェア制御のために抽象化された API を提供しており、無線通信用ソフトウェアでは通信制御のために MAC 層と物理層を定義し、それぞれに対する API を提供している。また開発用ソフトウェアでは、外部のデバイス (PC 等) からのモジュールへの高速ロードやダイナミックロードなどをサポートしている。これらのソフトウェアによってアプリケーション開発に対する汎用性や利便性の向上を図っている。

ユビキタスコンピューティング環境に向けたセンサネットワークに関する研究開発はまだ歴史が浅いため決定的なアーキテクチャに欠けている。このため、U³ は、各コンポーネントの独立性を重視し、ハードウェア的にもソフトウェア的にも、アーキテクチャの再構

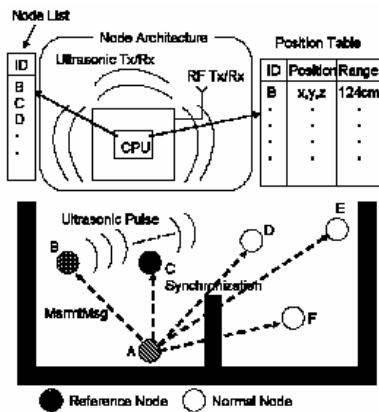


図 3 DOLPHIN

成が柔軟に行えるようになっている。

3.1.2 位置情報取得システム DOLPHIN

さまざまな状況に応じて適切なサービスを提供するコンテキストウェアな環境を実現するには、屋内における位置情報の取得方法が重要な課題である。これまで、高精度に屋内測位ができるシステムとして Active Bat [13] や Cricket [14] などが研究されてきた。これらのシステムは超音波を利用し、あらかじめ位置がわかっている複数の基準となるデバイス（以下基準デバイス）からの超音波伝搬遅延時間を計測し、高精度な 3 次元測位を実現するシステムである。しかしながら、これらシステムをビル等の大規模な環境に適用しようとした場合、基準デバイスの位置設定のコストが無視できなくなる。また、超音波は電波と異なり、障害物を通過しないため、机や棚などにより超音波が遮蔽されてしまい、測位ができなくなる状況が数多く発生する。このような観点から、筆者らは必要最低限の基準デバイス設置コストで、屋内のどこでも 10 数センチ以内の誤差で 3 次元測位を実現するシステムとして DOLPHIN の設計と実装を行ってきた [3]。

DOLPHIN はシステム内から集中制御の要素を排除し、自律分散制御でオブジェクトの位置を決定することができるという点に特徴がある。実際の室内環境に DOLPHIN システムを配置する際は、空間中の必要最低限の数個の基準デバイスのみに関して位置を決定すれば、そのデバイスを用いてその他の基準デバイスの位置を再帰的に決定することができる。通常、広範囲あるいは複雑に入り組んだ屋内構造物の場合は数多くの基準デバイスを設置しその座標をあらかじめ正確にシステムに登録しておくことが必要となるが、DOLPHIN はこのような作業を軽減することができる。

3.2 ユビキタス向け端末デバイス

実世界環境中にデバイスが遍在すればするほど、こ

れらをいかにして操作するかという課題が顕著になってくる。

ユビキタスコンピューティング環境を想定し、様々な機器をより便利に利用するために Jimi, Universal Plug and Play, HAVi など、数多くのミドルウェアアーキテクチャが提案されてきた。これらのアーキテクチャの多くはネットワーク上での機器の自動認識や設定を行うプロトコルと、機器の情報を管理するディレクトリサービスを具備し、ディレクトリサービスにアクセスすることで、所望のサービスを提供する機器を発見し、それを利用できる枠組みを提供している。しかしながら、これらのミドルウェアは、ユビキタスコンピューティング環境が、コンピュータネットワークとソフトウェアオブジェクトによる仮想世界と、人や機器を含む物理オブジェクトからなる実世界とが融合した環境であるという点を有効に利用せず、仮想空間上のソフトウェアのみによって物理オブジェクト同士のインタラクションを実現しようとしている点に問題がある。

3.2.1 Smart Baton

我々は、ユーザインタフェースを提供するシステムは (1) 使用したい機器を容易かつ明示的に指定できること、(2) 各機器に適した制御インタフェースを使用できること、(3) 同時に複数のユーザによる機器の使用が可能であること、(4) ユーザによって機器が提供するサービスに差異を持たせることが可能であること、という要求条件を満たす必要があると考えている。これに向けて我々は、可視光レーザによる機器の指定と認証機構を用いたアプローチでこれらの課題を解決する、スマートバトンシステムの開発を行っている [15]。

スマートバトンシステムでは [16] や [17] と同様に、可視光レーザを用いて視覚的に機器の選択を行うアプローチを採用するが、レーザの認識に画像処理を用いるのではなく、受光面積の広いレーザ光受信デバイス（たとえば太陽電池など）を機器に内蔵させてレーザ光を認識する。可視光レーザにはユーザを識別するための識別子、ユーザが持つ端末のアドレスやポート番号などのデータを乗せることができ、このレーザ光を機器の受光部に当てることによって、誰がその機器を利用したかというのがわかるようになっている。機器は対象エリアの Certificate Authority が発行した証明書を用いてユーザ認証を行い、ユーザに機器の制御を許可する場合には、ユーザの持つ端末に機器制御用 GUI を転送する。このようにすることで、直感的、高速、かつ確実に機器を指定できると共に、認証結果等に基づいて、機器やユーザ毎に制御用 GUI や提供するサービスを変更することができるなど、柔軟性の高い

機器利用が可能となる。

3.3 スマートマテリアル

ユビキタスコンピューティング環境の実現においては、我々が生活する生活空間や街を如何にインテリジェント化するかも重要な課題である。これまで、いわゆるスマートスペースと呼ばれる実験環境が内外において構築されているが、このような環境を構築するためには莫大な費用と手間がかかるのが現状である。このような問題を解決するために、国内においても家具の中にコンピュータやセンサ、アプライアンスなどを埋め込んだ Smart Furniture [18] を利用することによって既存の生活空間をアドホックにインテリジェント化する試みが進められている。

我々も同様の問題意識を共有し、知的な生活空間を容易に構築するための材料（スマートマテリアル）の必要性と応用に関して検討を進めている。具体的には、前述の DOLPHIN や U³ などのセンサ群は、物理環境の情報を正確に取得しようとするセンシングデバイス自体は部屋の中で障害物を避ける形で設置する必要があり、壁や天井などの建材の一部に埋め込まれているのが理想的である。また、いずれのセンサデバイスも無線通信、バッテリー駆動により、ある程度の期間自律して動作することが可能であるが、無線通信は有線での通信に比べて1ビットあたりの送信コストが大きく、バッテリーによる電源供給も充電作業のコストを考慮すると非常に高価である。そこで、あらかじめ近接関係を取得するための RFID や、コンピュータチップ、ネットワークインタフェース、電源供給のための部材が組み込まれた建材などを用意することにより、これらの問題を解決することができると考えられる。

さらに、これら建材間で自動的にネットワークが構築・設定されるような機構を取り入れることにより、既存の実空間の空間的構造や環境自身とそれらに内包されるものや人との空間的位置関係をコンピュータ上に容易にモデリングすることが可能になると思われる。

4. ソフトウェア関連技術

4.1 実世界とのインタフェース用ミドルウェア

ユビキタスコンピューティング環境において、利便性の高い様々なサービスを提供するためには、実空間に接続されたセンサノードやアクチュエータの状態を仮想空間上で保持しておく必要がある。言い換えれば、実世界のリアルタイムなコピーを仮想世界に構築する必要がある。これに向けては、実空間と仮想空間の有機的なつながりを実現するためのモデルと、それらをネットワーク上で維持管理する仕組みが必要となる。

また、センサネットワークはセンサ情報を取り出すことはできても、それを有用な形でネットワーク上に保持しておくことは既存の枠組みでは難しい。このため、実空間情報を利用したさまざまなアプリケーションをサポートするためには、アプリケーションや上記リアルワールドモデルとセンサネットワークの間に実世界の情報をモデリングし、蓄積加工処理するためのミドルウェアが必要となる。また、これとは逆に、たとえば実世界のアクチュエータやロボットを仮想空間からコントロールできるようなミドルウェアも必要となろう。かつて、BSD Socket という統一的なプログラミングスタイルが浸透したことによって数々の魅力的なネットワークアプリケーションの登場をもたらしたように、仮想空間中のアプリケーションから物理的に遍在するトランスデューサのネットワークに対して統一的にアクセスするための手法をいち早く確立することは、非常に重要な意味を持つことになる。

ユビキタスコンピューティング過渡期の現在においては、目的に応じて実に多様で異質なネットワークがひとつの物理空間中に複数存在する傾向にある。現実には、従来からの PC を中心としたコンピュータネットワークにおいては IP 技術が完全に支配的であり、今後もその傾向は続いていくものと思われる。それに対しセンサネットワークなどでは、物理的制約やアプリケーションを意識して従来の IP をベースとした通信方式にとらわれないまったく新しい形のネットワーク構成になるものと思われる。その一方で家庭内でのネットワークに目を向けると、さまざまな家電製品を含む機器類のためのネットワークとして UPnP, HAVi, Jini, ECHONET と実にさまざまなプロトコルやプラットフォームが林立している状況にある。極端なところでは惑星間の通信など、必ずしも常時接続ではなく RTT が数日要するような極端な通信環境のための新しいネットワークアーキテクチャに関する検討までも進んでいる [19]。

第1節にも掲げたとおり、ユビキタスコンピューティング環境の実現にはさまざまなオブジェクト同士の連携が必須である。この意味において、林立する異種ネットワーク間においてもオブジェクト同士が連携するための仕組みが必要となる。連携を実現するための仕組みとしては、ネーミング、アドレッシング、異種ネットワーク相互接続のためのトランスレータなどさまざまな技術が必要になる。なかでもネーミングはオブジェクトに対してセマンティクスを明確に与える役割を持つほか、オブジェクトの名前とアドレスとの動的なマッピングによりオブジェクトへの透過的なアクセスを実現する役割を持つ。ここでいう透過性とは、ユーザや

オブジェクトの移動に伴った環境の変化を隠蔽する移動透過性(空間透過性と呼ぶ), 数的に冗長なオブジェクトを隠蔽する並列透過性を指すが, いずれもオブジェクトが遍在する分散システム上で重要な役割を果たすものである。現在, 我々はネーミングをキーテクノロジーとしてとらえ, 既存のDNSやそのほかのネームサービスと相補的な関係を保ちつつさまざまな透過性を実現できるネーミング技術に関して検討を行っている [20]。

4.2 プライバシー/セキュリティ保護機構

ユビキタス環境では, ある意味において, 実世界空間におけるユーザの状態や好みなどといった個人情報と引き換えにサービスを提供することになる。センサがサンプリングする情報の中には性質的にユーザがそれを拒否しきれないものも存在する。また実世界のアクチュエータの不正操作は場合によっては生命の危機をももたらす危険性もはらんでいる。このため, ユーザのプライバシーや安全を確保するために, ユーザが危険性を知るための仕組みや, 外部に漏洩する情報を自由にコントロールできる仕組みが必須となる。

現在のところこれを解決するための決定的な枠組みを決定することは難しい。この領域をあいまいにしたままで実用化を迎えることはきわめて危険である。この点に関しては, テストベッド上でのトライアルを繰り返し, 人と人, 人と物の情報交換の折り合いを実践的に求めることが唯一の解決方法であると考えている。

5. おわりに

Weiserの示したユビキタスコンピューティング環境を実現するためには「遍在」「連携」「融合」という3つのキーワードを中心とする研究開発が必要不可欠であると我々は考えている。本稿では, センサやアクチュエータを含むトランスデューサを中心とした, 実世界と仮想世界の融合を目指すための実空間指向ネットワークングテストベッドについて, 技術課題と具体的な取り組みに関して報告した。

現在, ユビキタスコンピューティング社会のキラーアプリケーションの姿は未だ明確に見えていない。このため, 技術の可能性を示せるようなプロトタイプアプリケーションをテストベッド上に構築し, 実用的な観点からフィードバックを行うことも重要なことであると考えている。

文 献

[1] Mark Weiser: "The computer for the 21st century," *Scientific American*, 265(3):94-04, Sep., 1991.
 [2] Joanna Kulik, Wendi Rabiner, and Hari Balakrishnan: "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," *Proc. Mobicom '99*, Aug., 1999.

[3] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin: "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks," *Proc. Mobicom '00*, Aug., 2000.
 [4] Mark Weiser and John Seely Brown: "The Coming Age of Calm Technology," *Beyond Calculation - The Next Fifty Years of Computing*, pp. 75-85, 1997.
 [5] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer: "Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms," *Proc. CHI'97*, pp. 234-241, Mar., 1997.
 [6] Stephen S. Intille: "Change Blind Information Display for Ubiquitous Computing Environments," *Proc. UbiComp 2002*, LNCS 2498, pp. 91-106, Sep., 2002.
 [7] 永原崇範, 鹿島拓也, 猿渡俊介, 川原圭博, 南正輝, 森川博之, 青山友紀, 篠田庄司: "ユビキタス環境に向けたセンサネットワークアプリケーション構築支援のための開発用モジュール U³ (U-cube) の設計と実装," *信学技報*, IN2003-43, Mar., 2003.
 [8] G. Pottie and W. Kaiser, *Wireless Integrated Network Sensors*, *Communications of the ACM*, vol. 43, pp. 51-58, May, 2000.
 [9] SCADDS: Scalable Coordination Architectures for Deeply Distributed Systems, <http://www.isi.edu/scadds/>
 [10] WEBS: Wireless Embedded Systems, <http://webs.cs.berkeley.edu/>
 [11] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin: "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Jun., 2002.
 [12] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson: "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring," *Proc. First ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Sep., 2002.
 [13] Andy Ward: "Sensor Driven Computing," PhD Thesis, University of Cambridge, 1998.
 [14] Nissanka B. Priyantha, Allen K. L. Miu, Hari Balakrishnan, and Seth Teller: "The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications," *Proc. of Mobicom 2001*, pp.1-14, Jul., 2001.
 [15] Akira Saito, Yoshihiro Kawahara, Masateru Minami, Hiroyuki Morikawa and Tomonori Aoyama: "Smart Baton System: A Universal Remote Control System in Ubiquitous Computing Environment," *Proc. International Conference on Consumer Electronics 2003*. (to appear)
 [16] Dan R. Olsen Jr. and Travis Nielsen: "Laser pointer interaction," *Proc. CHI2001*, pp.17 - 22, Mar., 2001.
 [17] 星野剛史, 堀井洋一, 丸山幸伸, 片山淳詞, 柴田吉隆, 吉丸卓志: "Air-Real: ホームネットワークのユーザーインタフェース," 第9回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, Dec., 2001.
 [18] Soko Aoki, Masana Murase, Kenta Matsumiya, Jin Nakazawa, Nobuhiko Nishio, Kazunori Takashio and Hideyuki Tokuda: "Smart Furniture: Improving Ubiquitous Hot-spot Environment," *情報処理学会, 情報家電 研究報告*, 2002-IAC-4, pp. 3-7, Nov., 2002.
 [19] Kevin Fall: "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets," *IRB-TR-03-003*, Feb., 2003
 [20] 南正輝, 杉田馨, 森川博之, 青山友紀: "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. J85-B, no. 12, pp. 2313-2330, Dec., 2002.