

ユビキタス・コンピューティング新時代

坂村 健

ユビキタス・コンピューティングについて、まずその定義と簡単な歴史に触れ、今までのコンピュータ利用との違いを述べる。次にこの技術によりどのようなこと可能になるのか具体的応用例を挙げる。また現実社会に適用した場合に起きる安全性やプライバシーの問題点を述べ、ユビキタス・コンピューティングが実用化されるであろう時期と取り組み方について論じる。そして最後に我々が進めている実用化のための研究開発体制について述べる。

キーワード：ユビキタス・コンピューティング、IC タグ、センサネットワーク、セキュリティ、プライバシー

1. ユビキタス・コンピューティングとは何か

Mark Weiser が、「未来のコンピュータは私たちがその存在を意識しないような形で生活に溶け込んでいく」という概念に「ユビキタス・コンピューティング (Ubiquitous Computing)」という言葉は初めて使って論文[1]を発表したのが1991年。筆者はそれ以前の1984年にTRONプロジェクト[6]を開始したときから、「将来のコンピュータは日常のあらゆるものの中に入り込み、人々の活動を支援していく」という「どこでもコンピュータ」という考え方を提案し、その実現につとめてきた。Weiserのユビキタス・コンピューティングという言葉が登場してからは、我々の努力を理解する人々が徐々に増えていった。欧米ではユビキタス・コンピューティングは、コンピュータサイエンスの一分野としては定着しているが一般にはほとんど知られていない。これに対し、日本や筆者の著書[10]が翻訳されている韓国をはじめとするシンガポールなどアジア圏では、マスコミもしばしば取り上げるほど知られるようになった¹。

ユビキタス・コンピューティングとは、あらゆるモノの中にマイクロチップ、センサ、アクチュエータを入れるなどして、コンピュータ自身を現実世界に進出させ、実世界の「状況」を認識し活用させることに主眼を置いた新しいコンピュータ技術である。センサは外界の情報を取り入れ、マイクロチップは処理を行い、アクチュエータは外界に働きかける。実世界の「状

況」というのは、今この場所はどこなのか、温度や湿度がどのぐらいなのか、この人はだれなのか、この商品はいつ作られたものかなど、多種多様な現実世界の情報である。その状況を環境中に数多く配置されたコンピュータ組み込み機器群が自動認識し、ネットワークにより互いに協調し、人間の生活をより良くするようにサポートする。このようなシステム・モデルを指す。

従来のコンピュータ・ネットワークは、インターネットのホームページに代表されるように、接続されているコンピュータが実際に世界のどこにあるかといったことを意識しないように考えられていて実世界と切り離されている。地球の反対側にあるサーバ上のホームページも隣のサーバと同様にアクセスできる。これがインターネットを「仮想空間」とも呼ぶゆえである。しかし、ユビキタス・コンピューティングは現実の世界を反映したモデルであり「どこにそれがあるか」という位置の概念は、最も基本的な「状況」の一つである。

ユビキタス・コンピューティングの研究には、さまざまなアプローチがある。当初は人間にとってより自然なユーザインタフェースを求めて、現実世界のモノを介してコンピュータを操作する実世界指向ユーザインタフェースの研究が多く行われた[2]。また、精密

¹ 我が国で特有な現象として、野村総合研究所が、ユビキタス・コンピューティングを参考にして、「いつでもどこでも誰とでもつながるネットワーク」という意味で「ユビキタス・ネットワーク」という言葉を2000年に提唱し、政府もe-Japan計画の一環として推進しているため、一般には「ユビキタス・ネットワーク」の意味が先に知られるようになった。そのため「ユビキタス」という技術用語の理解には専門家レベルでもいまだに混乱が見られる。

な位置情報を把握する位置システム (Location System) [3]をはじめとする現実環境の情報をとらえる技術の研究が進んだ。ソフトウェア面では、その場の状況により処理を変更するコンテキスト・ウェアネスなどが重視されるようになってきた。そして数年前からユビキタス・コンピューティングのための要素技術としてICタグ (RFID, Radio Frequency Identification) [4]やセンサネットワーク [5]などが技術的にもコスト的にも実用になってきて、成熟してきた各要素技術を統合化してトータルなシステムを構築しようという気運が高まってきている。将来的には、現実の生活環境に埋込まれた数億から数兆にのぼる超小型チップのネットワークが我々の社会を陰から支えることになるだろう。

さて、このようなユビキタス・コンピューティング



図1 ユビキタス・コミュニケーター

環境で、小さなチップがいろいろなモノの中に入っているとき、どうやってそのチップの情報を読むのだろうか。我々の構築しているユビキタス・コンピューティング環境では、重要な役割を占めるものが「ユビキタス・コミュニケーター (UC)」と呼ばれる小型の携帯端末である (図1)。一つの端末で携帯電話になり、無線LAN 端末にもなり、また超小型チップの内容を電波で読むような特殊なアンテナ装置が付いている。モノに付けた超小型チップの内容を読んで、その読んだ情報をさらに無線により外に送ることができる (図2)。この機能を使い、超小型チップの記憶容量が少なくてもチップにはモノを区別するための番号だけを入れておき、その番号に対応するコンテンツは別のサーバに入れておいてUCで見ることができる。また、逆にその端末を身に付けた人がどういう人かの情報を (許された範囲で) 環境側に伝える。人と人だけではなく、人とモノのコミュニケーションの仲立ちをする汎用的な機械である。

2. ユビキタス・コンピューティングの可能性

このように社会全体であらゆるモノに超小型チップが付き、家電などコンピュータ組み込みの機器からその情報が読み取れるようになると、センサネットワークにより状況を高精度に把握することで、さまざまな過程できめ細かい制御を行えるようになってくる。エネルギーの問題を例にとると、小さなセンサチップを衣服に付けると、体の表面温度やこれまでの熱履歴がわかり、その情報を直接空調設備に送ることによって個人個人に最適の温度調節を行うことが可能になる。こ

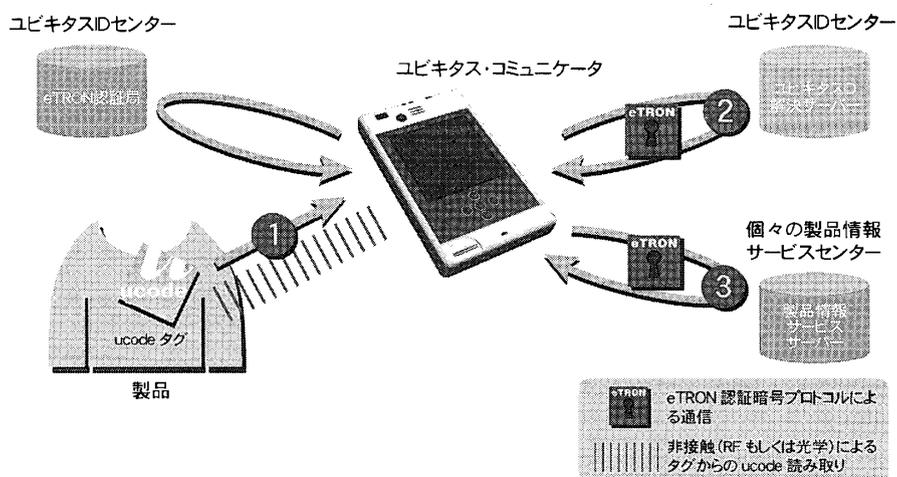


図2 ユビキタス・コミュニケーターが情報を表示するしくみ

れにより、リモートコントロールで行うよりも手間がかからない上に適切な温度制御ができるようになる。例えば、暑い外から帰ってきたばかり人は、その瞬間だけすばやく冷やして熱履歴をリセットすれば、その後は逆にあまり冷やさなくても快適と感じるようになる。また、同じチップがその日の着用状況から汗などの汚れの量を推定してくれれば、洗濯機がそれを読み取って、汚れが少なければ簡単な水洗いで済ませるなどの判断も可能になる。衣服に汚れセンサが組み込まれるようになれば、さらに判断材料が増える。このように、細かい個人向けの制御を行うことによって快適性を維持したまま不必要なエネルギーや資源の消費を避けられれば、社会全体としての実効的な省エネルギーならびに省資源にもつながるだろう。人間の生活環境の細かな「状況」をコンピュータが把握できると、一つ一つの過程での効果は少なくとも、トータルシステムとして今までにない効果を得ることができるようになるのである。

家には床から壁まで多数のコンピュータが組み込まれるようになる。建材の強度をきめ細かく配置されたセンサネットワークが監視し、寿命が来れば警告を発することもできるようになる。傷みが目立ってくれば、リフォームを勧めるなどのアドバイスを出すこともできよう。集合住宅では住む人が次々と変わっていても、建物の100年以上の履歴や状態がわかるようになる。また家電製品はもちろん、家庭用品から衣類、薬品、食品のパックに至るまでコンピュータが入るだろう。ユビキタス・コミュニケーターをリモコン代わりに身につけて部屋に入ればまわりの空調や照明は、好みに合わせてくれるし、レンタカーに乗れば最適のドライビングポジションに合わせてくれる。街の掲示板は、文字の大きさや色など見やすく変化してくれる。外国の人に対しては自動翻訳により外国語で表示もできる。つまり高齢者や障害者を含むすべての人にとって、街中のまわりの環境の方が各個人の身体条件を配慮して気を使ってくれるようになる。

医薬品分野への応用でいえば、薬品を冷蔵庫や収納庫に入れれば、在庫と保持期限がただちにわかる。不足品は自動的に注文を出すこともできる。すべての病院における医薬品の在庫がリアルタイムでわかるようになれば、ワクチンのように供給が限られているものは、在庫の多い病院から少ない病院に融通したり、さらに特殊な血清や解毒剤のように薬品が限られていて緊急を要するときは、最短時間で配送できる方法が直

ちにわかる。すべての医薬品の在庫が現在どこにどれだけあるといった情報を知ることができるようになれば、無駄を減らし効率的な利用にもつながる。

大容量のチップならカルテ情報や投薬記録をまるごと入れられる。アンテナ一体型のチップをそのまま患者のツメに接着すれば、まるごと消毒可能なので、入院から退院までずっと患者と不可分のデータキャリアとして使える。投薬時に、患者のツメのチップと会話して投薬指示を確認すればミスを大きく減らせるし、さらに薬と患者の体質や病歴のマッチングを確認して投薬指示自体に疑問がある場合、担当医に携帯電話などで連絡して再確認を求めることもできる。医療廃棄物もインテリジェントゴミ箱に捨てれば、各製品についているICタグにより人間がやるよりもうまく自動的に分別し、それぞれに適した安全な処理が行え、再利用可能な資源についてはリサイクルが行われる。

家庭薬でも、服用時に各自が持つユビキタス・コミュニケーターを薬の箱にあてれば、期限切れの薬はもちろん、各自の体質に合わない薬や、常用している薬や最近服用した薬の記録とつき合わせて併用してはいけない薬を警告してくれたりするようになる。また声で結果を知らせてくれれば、目の不自由な人やお年寄りにとっては、薬を手探りで飲む不安がなくなるだろう。

もちろん流通段階でも多くの利用が考えられる。ICタグでは、バーコードと違い製造メーカーと商品名だけでなく商品一つ一つを見分けて管理できるので、円滑な流通を行うことができるだけでなく、問題が出たらそのロットだけ回収もできる。収納庫がネットワークで公開される危険情報を受けて、庫内を自動チェックし「この薬品は危険リストの中に入っています」と警告してくれれば、製造時の問題が起こっても、問題のある薬品が使用される前にそのロットのみを速やかに回収できる。厚生省から家庭薬に関する緊急安全性情報が出た場合でも、流通段階で回収できなかったとしても、ネットワークに危険情報を上げておけば、飲もうとした人のユビキタス・コミュニケーターが確認して水ぎわで警告して事故を防止するといったこともできる。

ワクチンなど保存温度が品質に大きな影響を及ぼす医薬品については、先の衣服センサチップの例のような温度センサ付きの超小型チップを付けておけば、物品から「10℃以下での保存が必要」といった要求を倉庫の空調システムに流したり、空調が不調のときには「保存温度が高すぎる」といった警告を発したり、販

売段階で品質の劣化を察知することもできる。

このように、人の健康に直結する薬品ではこのトレーサビリティのメリットは特に大きい。またあまりいい話ではないが、トレーサビリティには盗難された商品や偽物の再流通の阻止といった犯罪防止の側面もあり、流通業界ではこの点を重視している。実際に第三世界では品質の落ちた盗難医薬品で命を失う人もおり、米FDA (Food and Drug Administration) では世界の医薬品の10%が偽物で、地域によっては50%にもものぼるとしている。そのような意味でもこの技術は有効であろう。

3. 安全性、プライバシーなどの問題点

このように社会を大きく変える可能性がある夢の技術であり、大きなビジネスチャンスがあるため、ちょっとした電機・電子系企業はもちろん商社などでもほんの1、2年で「ユビキタス」と名がついた事業部がどんどんできていく。この考え方を「どこでもコンピュータ」として世界に先駆けて15年以上前から唱えてきた私としては隔世の感がある。

このように有望な未来の技術に皆が注目するのは望ましいことなのだが、あまりの集中的な注目に危なさも感じる。米国ではカミソリにまで5セントの超小型ICチップを総計何億個もつけて流通管理する計画もあり、多くの専門家は技術的に無理があると考えている。読み取り精度はまだ完全ではないし、低価格の消費財に大量に付けられるようになるのにはまだ何年もかかり、それまでには技術面だけでなく、制度的にも、社会的コンセンサス醸成のためにもやるべきことは多い。それを効率重視で先走ったため米国では買った物が捕捉されるのは個人に対する重大なプライバシー侵害だと反対する市民団体もすでに出てきており、現在では個別の商品にICタグをつける計画は中止するところが続出している。米国最大のスーパーWal-Martが2005年から始めようとしている流通段階でのICタグの導入でも、ICタグはパレット(貨物の運送や保管に使う荷役台)やコンテナにつけるに留まり、個別の商品にはつけない。

問題は起きてから対処すればよいと考えるには、ユビキタス・コンピューティングはあまりに影響する範囲が広い。インターネットのようにいつの間にか迷惑行為が蔓延するようになったのでは現実社会の生活は成り立たなくなるため、最初からセキュリティやプライバシー保護を考える必要がある。超小型チップの読み

取りにどのような周波数帯や電波出力を使うかは、電波行政との関係や読み取り電波の生体に対する影響も考えなければならない。世界共通が前提のインターネットと違い、実際のモノが関係してくる以上、各国の法律や文化や習慣などローカルな要素が無視できない。重要な技術だからこそ、ボタンを掛け違えないように大事に育てないと取り返しがつかないことになりかねない。

実はICタグや位置システム、センサネットワークなど、ユビキタス・コンピューティングにかかせない技術はまだ発展途上で完成したとはいえない。ICタグだけをとっても、万能でどんな用途にも使えるICタグは存在しない。物流などに使おうとすると数m以上離れた場所から読めるタグが歓迎されるが、プライバシー保護の面からは必要以上に離れた距離から読めると逆に欠点となってしまいうタグのサイズも大きくなってしまふ。位置システムもモノや人の位置をどのような環境でも数cmの精度で検出できる万能の技術は開発されていない。

ユビキタス・コンピューティングでは、当初から情報セキュリティ技術が非常に重要と考えられている。コンピュータが現実世界の「状況」を把握しているということは、やみくもに使われれば監視社会の悪夢につながるし、その情報を不正に盗み出すだけで、労せずして完全なストーカー行為が可能になる。どんな薬を使っているかといった情報は最重要のプライバシーだろう。逆に、偽の情報を与えて体質に合わない薬をわざと飲ませて、危害を与えるといった犯罪も考えられなくもない。

とにかく生活空間にたくさんのコンピュータを配するわけだから、システムが丸ごと悪人の手に落ちるこ

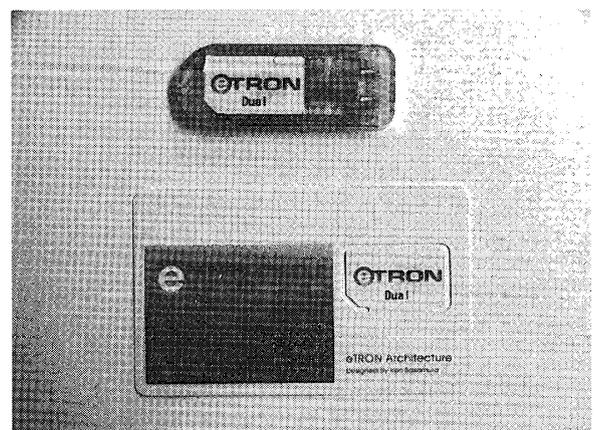


図3 eTRON ハードウェア

ともありうる。極端な話、正規の利用者であっても悪人も知れない。抗がん剤などを考えると、善意の利用者であっても正しい情報にアクセスさせられないといった複雑なケースも考えられる（ただし、利用者に知らせずシステムが他の薬との相互作用をチェックができるといったメリットもある）。つまり、所有者も信じられないという状況では、ソフトウェアによる保護には限界がある。どうしてもセキュリティのための特別なハードウェアを入れてやる必要がある。これが我々が開発している eTRON [7] という特別な回路で、複製不能、偽造不能の電子データを安全に流通させるための分散システムのフレームワークである（図 3）。

4. 実用化時期

ユビキタス・コンピューティング社会がいつ実現するかには、セキュリティ問題と並んで、チップはいくらかというコストの問題を考えなければならない。すべてのモノにつけるとなったら、応用ごと、つけるモノの種別ごとにさまざまなタイプの超小型チップ（図 4）を、何億というオーダーで生産する必要が出てくる。すでに、飲んでも安全な砂粒大のチップというものも研究されており、必要なら錠剤やカプセル一つ一つにチップを入れて管理することまでできるようになるだろうが、低価格で安全な超小型チップを開発するとすると、製造技術などでまだまだ多くの研究開発が必要である。ちなみに、番号を読み取れるだけの単純なチップの場合すでに 100 万個一括注文で 10 円台になっている。しかし、プロセッサの入ったチップやセンサの入ったチップは 100 円以上する。

そこで、最初は安全性が問題になる薬品や食品や高額商品のトレーサビリティやなどメリットがコストを上回る応用からスタートし、コストや大量生産手法な

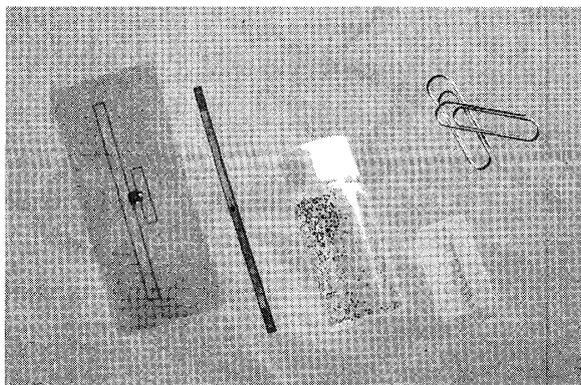


図 4 IC タグ

どさまざまな問題を着実に解決しながら、徐々に応用分野を広めて普及していくというのが、日本における普及の正しいあり方だろう。最終的な理想イメージが実現するまで 10 年かかってもおかしくないし、先にも上げたプライバシーやセキュリティについての社会的なコンセンサスといった問題を考えると、むしろかけたほうがいいともいえる。

欧米では流通過程で商品の減失（シュリンケージ）が多く内部の人間による抜き取り、取引先的不正取引、万引などが主原因とされ IC タグはその防止を主目的とした常時監視に使われようとしている。これに対して我が国では、いきなり IC タグで商品すべてを管理するのではなく、現在使われているバーコードによるシステムと併用しながら、少しずつ移行していく可能性も高い。我々のユビキタス・コミュニケーターは、IC タグもバーコードも扱えるようになっている。また欧米では、研究成果をビジネスとして立ち上げるのを急ぐためか研究機関で生まれた IC タグ、センサネットワークなどの要素技術が単独でニッチ市場向けに製品化されているが、我々は、単純な電波を受けて反射するパッシブ型の IC タグから自ら電波を発するアクティブ型の IC タグ、そして複数の無線ノードが通信しあうセンサネットワークまでを含めた総合的なユビキタス・コンピューティング環境を構築しようとしている。

5. 実用化のための研究開発体制

最後に、我々がこのユビキタス・コンピューティング実現のためにどのような活動を行っているかをご紹介します。

まず、先にあげた基盤技術の確立に関しては、eTRON を含め YRP ユビキタス・ネットワークング研究所、東京大学の筆者の研究室がかなりこの基盤技術開発について強く関与している。

また、ユビキタス・コンピューティングに関係するコンピュータ組み込みのシステムというのは、パーソナルコンピュータよりも圧倒的に数が多いため、品質の高い大量のコンピュータ組み込みの機器を、安定して開発できる体制が必要となる。パーソナルコンピュータのようにバグが出て止まってしまってもユーザが我慢してくれるなどという「半完成品」と違い、実生活にかかわる機器では、エラーは場合によっては生命・財産にかかわるからだ。

この開発体制のために我々の提案しているのが

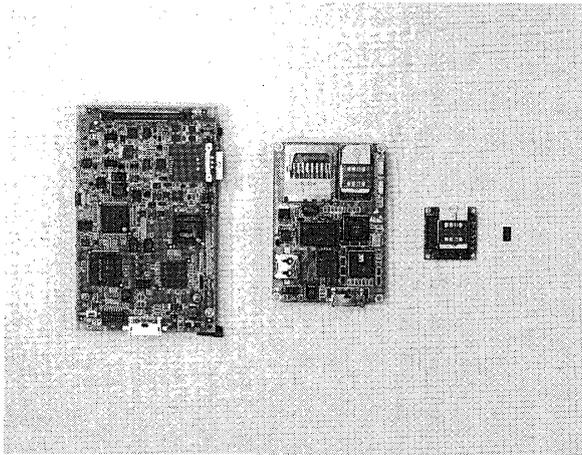


図5 T-Engine

「T-Engine」[8, 9]というプラットフォームである。T-Engineというのは、組み込み機器開発のためのオープンな標準ハードウェアプラットフォームであり(図5)、ルールを決めて、その中で効率的に品質の高い組み込みシステムの開発が可能ないように考えられている。このプラットフォームの展開のために、T-Engine フォーラムを設立した。おかげさまで、設立時22社が、2004年3月の時点で330社を超え、非常に大きなフォーラムになってきている。

最後に、どうやってそれを運用していくかという体制の問題が上げられる。あらゆるモノにコンピュータを入れるといっても、入れるときにどうやって違うものかという区別をつけるのか。セキュリティの保障はどのように行うのか。実社会に密着するものであるために、そのような運用上の問題が非常に重要になる。

特に重要なのがモノの認識に必要な識別ID (Identifier) であり、そのIDを利用する基盤の共通化、つまり、モノに付けるタグの番号の付け方を統一しなければいけない。「このモノは何か」という同定が、状況認識の基本だからである。このIDについて、どういう番号体系で振るのか、そこからどうやって関連する情報に結びつけるか、さらにどうやって通信するのか、どうやってセキュリティを守るのかといった手続きや仕様を共通化しないとイケない。

読み取るところの仕様まで共通化すれば、各自の持つ携帯電話を標準の読み取り装置にすることも可能になる。ユビキタス・コミュニケーターを全員が持っているという状態になって、初めて理想のユビキタス・コンピューティング社会が可能になるからだ。

このようなモノにつけるIDの運用体制は、インターネットのような「仮想世界」が対象でなく、あくま

でも実世界と密着している以上、「グローバルスタンダード」というわけにはいかない。文化や法律や習慣などさまざまな地域的特性が関係することが避けられず、技術では多くの部分が共用できても、運用は地域ごとで行うことが望ましいと考えている。そのために我々は他のコードも包含可能な ucode という柔軟性の高いID体系を提供している。

欧米の製造業や流通業が流通過程の効率化のために1999年に設立したICタグの標準化機関 Auto-ID Center は、2003年9月にEPC Ver.1.0という独自規格を発表し、その目的を達したとして解散、研究機関の Auto-ID Lab と標準化機関の EPCglobal inc が新たに設立され、役割を受け継いだ。しかし、兵站業務におけるICタグの全面的採用を予定している米国防総省からの要請でISOに準拠した規格が求められ、現在の規格は振り出しに戻って検討されている。先行きが不透明になってしまった。統一化は2005年後半に現れるとされるEPC第二世代準拠のICタグまで先送りされたと考えるべきだろう。

国際的な標準は重要であるが、時間がかかるのである。そこで、我々が主体性を持って進めていくために日本には日本のための運用センターが必要であると考え、我々はそのためにユビキタスIDセンターをT-Engine フォーラムと合わせ設立した。ここでは、ID割り当てに関する実務、既存の各種ID体系との連携の確立、さらに ucode 運用に当たってすべての関係者が守るべきセキュリティ・ポリシーの確立と、そのための技術的な検証・認定などの作業を行っており、欧米の企業も多く参加する全世界300社以上のフォーラム会員とデファクトスタンダードを目指した標準化活動を活発化させている。

6. おわりに

2004年1月から2月にかけては、ユビキタスIDセンターやT-Engine フォーラムが中心となって、昨年からは始めていた農林水産省平成15年度食品トレーサビリティ開発・実証試験『ユビキタスID技術を用いた青果物トレーサビリティシステムの構築』のスーパー店頭での実証実験を行った(図6)。これは、野菜を畑に種蒔きして育成、そして収穫、それを流通経路に乗せて小売店に出すまでの過程、その情報をユビキタスID技術を使って収集し、また同じ技術で一つ一つの野菜に対して消費者が確認できるようにしたもので世界に例がない。ICタグの専門家の間では、日本



図6 青果物トレーサビリティ実証実験

では欧米のように流通过程に今すぐ IC タグを導入することのメリットは薄く、安全性やトレーサビリティなどを提供する応用が求められているという見方が多い。この実証実験はまさにそのような新しい価値を生むもので、参加していただいた方々には好評だった。

このように YRP ユビキタス・ネットワークング研究所と T-Engine フォーラムとユビキタス ID センターの三位一体の体制を通して、ユビキタス・コンピューティングの世界に対して強い技術的イニシアチブをとっていききたいと我々は考えている。同時に、オープンアーキテクチャの概念のもとに全世界にテクノロジーを積極的に提供し、各国、各地域でのユビキタス ID センター設立をバックアップし、世界に対してこれからの日本が果たすべき貢献の一助となることを希望しているのである。

7. 参考ホームページ

- ・ T-Engine フォーラム : <http://www.t-engine.org>

- ・ ユビキタス ID センター : <http://uidcenter.org>
連絡先
〒141-0031 東京都品川区西五反田 2-20-1 第 28 興和ビル
YRP ユビキタス・ネットワークング研究所内
E-mail : uid-office@uidcenter.org
TEL : 03-5437-2338/FAX : 03-5437-2271

参考文献

- [1] M. Weiser : "Computers for 21st Century", Scientific American, 265(3) : 66-75, 1991.
- [2] G. D. Abowd and E. D. Mynatt : "Charting Past, Present and Future Research in Ubiquitous Computing", ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 7(1) : 29-58, 2000.
- [3] J. Hightower and G. Borriello : "Location Systems for Ubiquitous Computing", IEEE Computer, 34(8) : 57-66, 2001.
- [4] K. Finkenzerler : 『RFID ハンドブックスー非接触 IC カードの原理と応用』, 日刊工業新聞社, 2001.
- [5] J. M. Kahn, R. H. Katz and K. S. J. Pister : "Next century challenges: Mobile networking for 'smart dust'", Proc. MOBICOM, Seattle, 271-278, 1999.
- [6] 坂村健 : 「TRON トータルアーキテクチャ」, 『アーキテクチャ・ワークショップ・イン・ジャパン '84』, 情報処理学会, 1984.
- [7] K. Sakamura and N. Koshizuka : "The eTRON Wide-Area Distributed-System Architecture for E-Commerce", IEEE MICRO, 21(6) : 7-13, 2001.
- [8] K. Sakamura and N. Koshizuka : "T-Engine: The Open, Real-Time Embedded-Systems Platform", IEEE MICRO 22(6) : 48-57, 2002.
- [9] TRONWARE 編集部編 : 『別冊 TRONWARE: T-Engine』, パーソナルメディア, 2003.
- [10] 坂村健 : 『角川 one テーマ 21: ユビキタス・コンピュータ革命一次世代社会の世界標準』, 角川書店, 2002.