

## シンビオティック・システムの実現に向けて

—人, 社会, 環境, 情報システムの協調系—

# 5 ウェアラブル・ユビキタス コンピューティング

—超小型コンピュータと人, 物, 実世界のシンビオシス—



塚本昌彦\* tuka@kobe-u.ac.jp

\* 神戸大学工学部電気電子工学科

## はじめに

コンピュータが机上だけでなく実世界で使われるようになってきた。携帯電話、デジタルカメラ、携帯音楽プレーヤ、組み込みコンピュータ、センサネットワークなどの高度な小型コンピュータ機器が、人々の普段の生活シーンで利用されている。このような新しい使い方をしようになったコンピュータは、人々の生活を便利で豊かなものにする反面、著作権の問題、デジタルデパイドやマナー、プライバシーや安全性の問題、過度の依存症など、さまざまな社会的問題を引き起こしている。

これから10年、コンピュータはもっと小さくなる。豆粒大、ゴマ粒大のコンピュータがすでに環境センシングや物品管理などに利用されるようになってきている。超小型のコンピュータを人の身体に装着して利用する場合をウェアラブルコンピューティング (Wearable Computing)、物や場所に埋め込んで利用する場合をユビキタスコンピューティング (Ubiquitous Computing) と呼び、その可能性についての研究が行われている。もはやコンピュータは単なる道具ではなく、人や自然環境とともに生きる物体と考えられるほど進化している。はたして人々はこの新しく強力な物体を、暮らしや社会の中でうまく活かすことができるだろうか。またこの物体は、自然環境の中でうまく他の生物と共生していくことができるだろうか。

本稿では、ウェアラブル、ユビキタスコンピュータという新しい物体のシンビオティックな側面について議論する。ここで、シンビオティックという言葉は、異なる

システム同士が協調・連携するための様相として捉える。主として作り込みではない単純なメカニズムによって異なるシステムが相互に適応し合うような形態を想定している。特に、小型のコンピュータがいかに社会環境に溶け込んで自然な機能を果たすことができるか、またこれらのコンピュータ同士がいかに互いに連携をとるか、さらにそれらの機器を人々がいかに意図するように使いこなすかといった点について、筆者のアプローチを示しながら考えを述べる。

## 物とコンピュータのシンビオシス

前章で述べたように、超小型コンピュータが物に埋め込まれて使われるという形態がユビキタスコンピューティングである。近年、ICタグや埋め込みコンピュータの技術が広く使われているが、これらはユビキタスコンピューティングの一種である。しかしこれらは主としてあらかじめ決められた動作を行うものであり、

- 汎用性：さまざまな用途に利用できること
- 柔軟性：さまざまな環境で利用できること
- 有機性：別の機器と連携して利用できること

というより高度な活用のためには、より高度なメカニズムが必要となる。それを実現するものがシンビオティックシステムと捉えられる。

従来から、高度な柔軟性や適応性を有するコンピュータシステムについては、分散人工知能や分散知識処理、エージェントなどの分野で盛んに研究が行われている。これらの研究成果の多くは、主としてコンピュータに知的な振る舞いをさせるために高度な計算をコンピュ

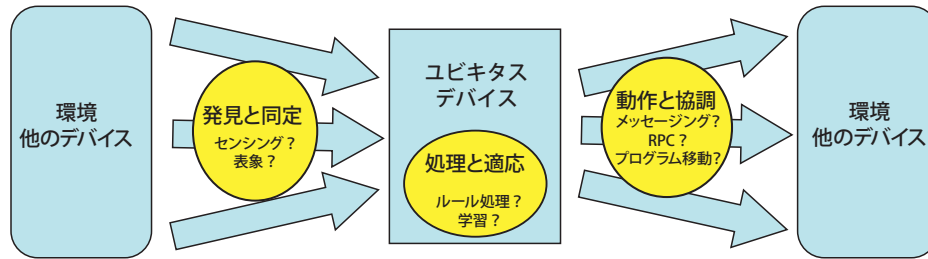


図-1 ユビキタスコンピューティングのためのシンビオティックシステム構成

一に課すものであるが、シンビオティックシステムはむしろその逆の方向からのアプローチである。すなわち、各システムには単体としての高度な知的振る舞いは求めず、むしろ単純なルールなどに基づく全体としての振る舞いを求める。また、簡単なルールに基づく全体としての知性の創成に関しても、古典的な人工知能研究の目標であった。本稿におけるシンビオティックシステムでは、目標は知的な振る舞いではなく全体としての調和であり、知能の実現ではなく人や環境との共生を目指す。

## ユビキタスコンピューティングのためのシンビオティックシステム

ユビキタスコンピューティングのためのシンビオティックシステムとして想定される基本構成を図-1に示す。それは以下の機能からなる。

- 発見と同定：周りの環境やサービス、物体を発見し、同定すること
  - 処理と適応：求められる処理を行い、周りの状況に応じて自己の振る舞いや状態を変化させること
  - 動作と協調：他者と協調して必要な動作を行うこと
- これらを、できるだけシンプルなメカニズムで実現することが重要な要求事項である。

### 発見と同定

実空間で周辺的环境やサービス、物体を発見し、同定することが、ユビキタスコンピュータが実空間において機能を果たすための最初のステップとなる。コンピュータサービスとしては、JiniやUPnP (Universal Plug and Play)、Bluetoothの発見手順、その他さまざまな発見メカニズムがあるが、ユビキタスコンピュータでは、本や茶碗、文房具や動植物、気象などもっと広範なものを対象とする一方、もっとシンプルで簡単なものが必要となる。物の識別やネーミングに関しては、ユビキタスIDやオートIDなどがあるが、これらはユニバーサルにIDを管理するものである。ユビキタス環境ではむしろ何ら

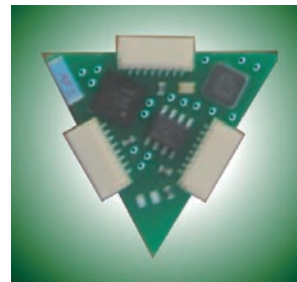


図-2 ユビキタス LISP チップ (ULIP)。簡略化した LISP のインタプリタを搭載し、簡単なプログラムで記号処理が行える。

かのコンテキストを環境内で共有していることを仮定して、1レベル下の短いIDを利用することが望まれる。

対象や事象の同定において記号化は重要なプロセスとなる。インターネットではXMLやセマンティックWebを用いて構造化された情報のグローバルな解釈と同定を可能にしているが、表現が長く高コストである。シンビオティックなやり方でローカルな一貫性がとれば、もっと低コストな表現が可能となる。筆者のグループでは、記号による表象と集合の取り扱いをユビキタスプログラミングにおける最重要事項と想定し、記号型プログラミング言語LISPを用いたユビキタスデバイス (ULIP) を実装した(図-2)<sup>1)</sup>。機能を絞ったLISPインタプリタがデバイス上で動作し、センサネットワーク内で再帰的なプログラムを動作させることでチップ群の制御が可能になる。ユビキタス環境におけるラピッドプロトタイピングやアドホックプログラミングに有効である。

### 処理と適応

ユビキタスコンピュータの次のステップは、求められる処理を行い、周りの状況に応じて自己の振る舞いや状態を変化させることである。「発見と同定」機能と同様これについても、できるだけ単純な方式が必要である。プログラミングの手法としては逐次処理型とイベント駆動



図-3 NEC・阪大グループによるユビキタスチップ AhroD. 数バイトでコーディングされたルールを数十個格納でき、格納されたルールにより IO やタイマ、通信の制御が行える。

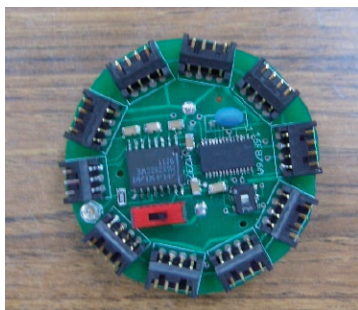


図-4 ルールエンジン書き換え型 IO 制御チップ. エンジンの書き換えによりルールの形式を変更できる。

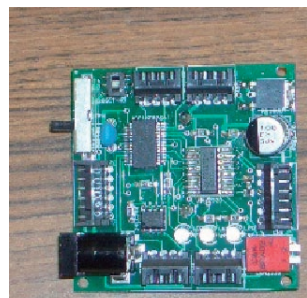


図-5 ユビキタス Q 学習エンジン. 入出力のパターンをチップ内で Q 学習により学習する。

型のものが古くから使われてきた。前述の ULIP は逐次処理型であるが、実環境でセンサ情報などの非同期情報を扱うにはイベント駆動型が有効である。

イベント駆動型のプログラミング方式を採用するユビキタスデバイス AhroD<sup>2)</sup> (図-3) では、環境や目的に応じて実行ルールを取り替えることで、柔軟な機能が果たせる。ルールは数バイトでコーディングされ、接続されたセンサやアクチュエータなどを動作させられるようになっている。これをさらに拡張したものがルールエンジン書き換え型 IO 制御チップ (図-4)<sup>3)</sup> である。エンジンの書き換えによりルール形式を変更できるようにしている。ルール処理型のエンジンは、シンビオティックシステムを実現するユビキタスデバイスの基本アーキテクチャとして自然なものと考えられるが、現時点では実用性が十分見えていないという問題を抱えている。適用性の高いルール設計が求められる。

一方、適応機能を持つ小型のチップを開発することは一般には難しい。通常の学習アルゴリズムには多くのメモリと計算パワーを必要とするためである。ユビキタス Q 学習エンジン (図-5)<sup>4)</sup> は、強化学習の中でも最もポピュラーな Q 学習を簡略化した学習エンジンを搭載した小型チップである。ユーザからの教示や学習パラメータの直接のダウンロードなどにより、適応性の向上を目指

している。学習チップに関しても実問題への適用性の問題がある。ユビキタス環境がまだまだ浸透していない時点で実用への導入は難しいが、シミュレーションなどを通じてよい事例を見つけていく必要がある。

## 動作と協調

3 番目のユビキタスコンピュータの機能である動作実行、連携、協調に対しては、ルール駆動とメッセージングのメカニズムが有効である。A ライフ、セルラオートマトンなどのようにシンプルルールでグローバルな連携が可能になることが知られているが、実用でどのようなメカニズムで連携をとるのがよいかについては知見が少ない。また、RPC やルール交換、プログラム移動などの従来からある分散プログラミング手法を利用することも考えられる。いずれの場合もコンピュータの小リソースを想定し、機能を絞る必要がある。

マイクロ Ja-Net (図-6)<sup>5)</sup> は、単純なマイクロコードを移動実行できるエンジンを搭載する。プログラムは、データの取得とパラメータの設定、外部との通信、自分自身のコード移動、繰り返しと簡単な演算という基本機能のみをサポートする。サーバやグリッドなどの高性能なコンピュータからコードを送り込まれ、センサネットワーク内をコードが移動して情報収集するという用途を想

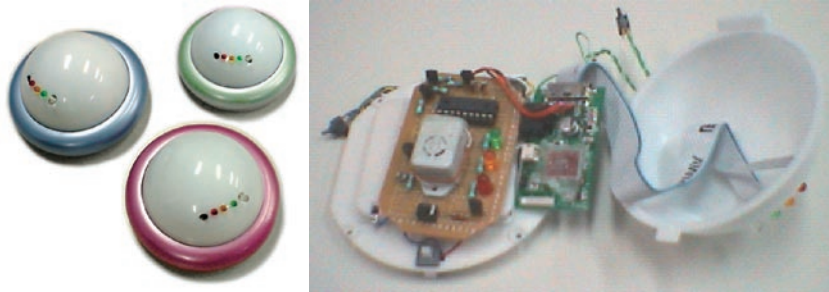


図-6 NTT・阪大グループによるマイクロ Ja-Net. 単純なマイクロコードを実行できるエンジンを搭載する. マイクロコード中にはノード間の移動を指示するコードを含むことができる.



図-7 さまざまなウェアラブルコンピューティング: 人とコンピュータのシンビオシス. 人に張り付いたコンピュータはまるで寄生虫のように人と共生して生きる.

定する. コード移動のメカニズムは比較的小規模なエンジンでも実現可能であるが, 移動先の発見や移動先の指定を数バイトのコードで正確に記述することが難しいという問題がある. 前述の発見と同定の機能とをうまくリンクして記述をコンパクトにできれば, コード移動機能の有用性が高まるものと考えられる.

分散コンピューティングや分散人工知能における本質的に難しい問題は簡単には解決できないが, ユビキタス環境の実問題の中では比較的自明な範囲での「プチ」連携なら可能かもしれない. 筆者らのいくつかのアプローチを示したが, そのうちのどの機能がどのサービスにとって必要かを見極めながら機能統合を図る必要がある.

### 自然界へのフィッティングに向けて

物に埋め込まれたコンピュータは自然界のバランスの中で他の生物と共生しなければならない. これはユビキタスコンピュータの動作原理に生態学の原理を応用することや, ユビキタスコンピューティングによる環境や生態系への影響を考慮する必要があることを意味する.

近年, 数理生物学や植物・動物生態学の分野が急速に発達し, 微妙なバランスを保ちながら常に変化する自然環境がうまくモデリングされるようになってきている. 生態学の主眼である生物個体の分布や数が環境と個体の相互の影響に関与する点や, 蟻の行列, 鳥の隊列, 蛍の

光の同期などの動物の群行動のメカニズムなどに, シンプルなルールやメカニズム, 方程式が当てはめられ, 全体としての挙動が説明されている. これらを, 実世界の中で利用されるユビキタスコンピュータの基本ルールとして用いることによって, 自然界と同様の調和がもたらされるかもしれない. 実際, ルーティング方式や分散同期アルゴリズムなど, 生物学の知見をベースとするコンピュータ間の分散協調方式に関する研究が行われている.

生態学, 理論生物学の知見が, ユビキタスコンピュータのシンビオティックメカニズムとして有効なものであるかどうかは, 今後の実践的な研究が必要である.

### 人とコンピュータのシンビオシス

人がコンピュータ機器を衣服のように身体に装着した状態は, まさにコンピュータが人に寄生した状態として捉えることができるため, 人とコンピュータのシンビオティックシステムとはウェアラブルコンピューティングとの関連性が非常に深い. ここで, 以下のようなさまざまなウェアラブルコンピューティングがある(図-7).

- ヘッドマウントディスプレイを頭に装着し, 腰にコンピュータ, 入力デバイスを付けたスタイル
- ディスプレイを服に取り付けた形態
- マイコン制御の LED を服に取り付けたファッション

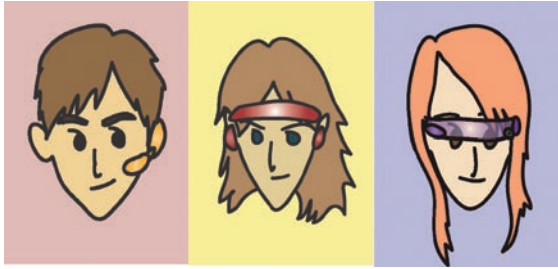


図-8 ウェアラブルケータイ、ウェアラブル音楽プレーヤ、ウェアラブルデジカメのイメージ。用途に応じて形態が異なる。

いずれもコンピュータ機器を装着して利用しているという意味でウェアラブルコンピューティングである。また、携帯、音楽プレーヤ、デジカメも、近い将来ウェアラブルに進化する<sup>6)</sup>。現在はポケット型であるが、利用時間、利用頻度が増えるといちいちポケットから取り出すのが不便になるものと考えられるためである。図-8に将来のウェアラブルケータイ、ウェアラブル音楽プレーヤ、ウェアラブルデジカメのイメージを示す。

## ウェアラブルコンピューティングのためのシンビオティックシステム

ウェアラブルコンピューティングのためのシンビオティックシステムの基本機能として以下が必要となる(図-9)。

- 操作と観測：ユーザがいかに操作し、周りの環境やサービス、物体をいかに観測するかということ
- 処理と蓄積：求められる処理を行い、周りの状況やユーザの情報、履歴を蓄積すること
- 補助と提示：ユーザを補助し、環境や他者に対してユーザにとってメリットのある情報提示を行うこと

ユビキタスデバイスと異なり、ウェアラブルデバイスでは必ずしもシンプルなメカニズムは必要としない。現在の携帯電話以上の計算・通信機能を想定できるためである。ユーザにいかにフィットするか、ユーザにいかに

メリットをもたらすかという点がより重要となる。学習や協調のメカニズムに関しても、ウェアラブルコンピュータはユーザに付随するものであるため、ユビキタスコンピュータほどの自律性は求められないものと想定した。また、ある程度の計算性能を仮定する場合、従来アルゴリズム、従来プロトコルの適用で済むことが想定される。

## 操作と観測

従来、コンピュータの操作はGUI (Graphical User Interface) を介して行われてきた。これは、人間がコンピュータに直接指示を与えるものであり、コンピュータ空間は実空間から乖離したものである。逆にウェアラブルコンピューティングは、実世界の中でのコンピュータ利用であり、これまでとはまったく異なるユーザとのインタラクションが想定される。ユーザの日ごとの生活を支援したり、業務の中で利用されるものであったりするため、さまざまなセンサやデバイスでユーザの状況を把握し、日ごとの生活・行動の中から意図をコンピュータがセンシングする必要がある。技術的には、マルチモーダルインタフェースや、イベント駆動型のメカニズム、ハンズフリーの入力方式が必要となる。

入力方式として、首振りとか指差しというようなジェスチャ入力の普及はあり得る。身振り、手振り、首振りなどのジェスチャ、視線、筋電、音声などのハンズフリー入力が重要であると考えられるが、難しい画像認識ではなく、むしろ簡単なセンサで拾えるようなやりかたがよいだろう。統一的なプラットフォームの構築は困難であり、業界や場所ごとに異なる入力体系となることが想定される。またこれらのインタフェースでは、意図しない操作をしてしまう誤操作、意図したとおりの操作をしにくいという操作性のトレードオフの問題があり、何らかの解決策が必要とされる。

ゲイズアンドシェイクインタフェース(図-10)<sup>7)</sup>は、HMDの画面を見つめたときにだけ首振りのジェスチャインタフェースが利用できるというハイブリッドな入力方法であり、誤操作の低減と操作性の向上を狙っている。

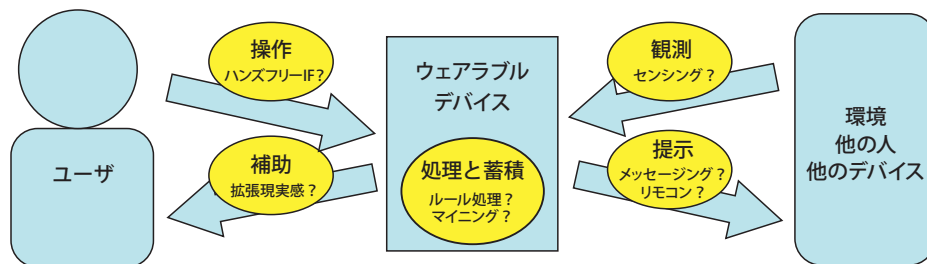


図-9 ウェアラブルコンピューティングのためのシンビオティックシステム構成

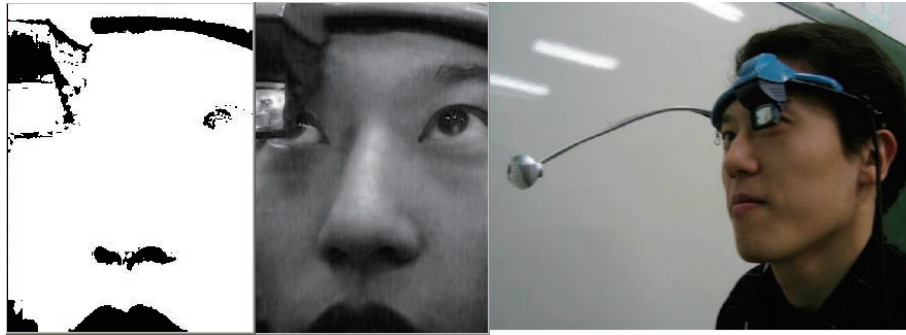


図-10 ハンズフリー入力的一种ゲイズアンドシェイクインタフェース。センサやカメラでユーザの状態を取得して情報の操作に利用する。デバイスとユーザの連携が必要となる。

## 処理と蓄積

ユーザの装着したコンピュータがユーザおよび環境情報を適切に処理するためには、プログラム実行環境が必要となる。現在の携帯電話よりもさらにいつでもアプリケーションプログラムが動作していることを想定しなければならない。そのため、マルチタスクでイベント駆動型であるが、省電力な実行管理が行えることが望ましい。

また、ウェアラブル環境においてユーザおよび環境に関する情報を蓄積することに対するニーズは高い。行動記録は物の置き場所や対人関係などのリメンブランスに有効であるし、カジュアルな会話を楽しく補助する上でも有効に活用できる可能性がある。

A-Wear<sup>8)</sup> は、ウェアラブルコンピュータ向けのアクティブデータベースシステムである。イベント、コンディション、アクションの3つ組によりデータベースアクセスを含む振る舞いを記述できる。ルール形式の記述は基本的にあらゆる環境や他の事物とのインタラクション、すなわちシンビオティックシステムの基本動作を記述する上で強力な武器となる。しかし、システムであらかじめ提供されている基本機能で望ましいインタラクションを完全に記述することは一般に難しい。ルール記述のためのプリミティブを柔軟に追加できるアーキテクチャが必要であると同時に、効率よくそれら进行处理すること、さらに省電力性や他のインタラクションとの整合性などさまざまな要因を考慮してチューンできることなど、いくつかの要因をコントロールできることが望ましい。

また、さまざまなサービスをうまく統合することはシンビオティックシステムとしての重要な課題の1つである。インターネット空間でWeb、P2P、SNSのようなボトムアップ的なコンテンツ生成メカニズムで雑多なサービスが混在し、検索エンジンやランキングサイトで統合利用されているのと同じように、実空間におけるさまざまなローカルサービスも、何らかのかたちでうまく統

合利用できるようにするプラットフォームが必要である。

## 補助と提示

ウェアラブルコンピュータのアウトプットとして、ユーザをどのように補助するかという点と、外部にどのように情報提示するかという点が重要である。ユーザ補助には音声や映像を用いたさまざまな手法があるが、ユビキタス情報ビューアが典型的である(図-11)。これは、身の回りのさまざまな情報をHMDを通して見るというもので、情報はそれぞれの場所で放送されていることを想定する。シースルー型のディスプレイを用いて、実空間に重畳してさまざまな情報が見えるような状況が想定される。このような技術は拡張現実感と呼ばれ、アイコンやウィンドウ、CG物体など、さまざまなものが重畳表示される(図-12)。位置合わせやシェーディングなどの技術はこれまでに数多く行われているが、仮想物体と実世界のシンビオシスに関してはまだまだ技術が未熟であり、以下のような論点が考えられる：

- 物理的なインタラクション：ぶつかる、壊れる、押す、乗るなど物理的なインタラクションを可能にしたい。仮想物体の上に実物体を乗せるなど、実現困難に見える状況も考えられる。実物体と仮想物体のインタラクションのための物理法則が必要である。
- 機能的なインタラクション：暖める、冷やす、反応させる、情報を提示するなど、機能的なインタラクションのためには、通信プロトコルが必要である。実物体のすべての組合せや機能に対して用意することは現実的でないため、簡単な表象と表象された事象の実現手段が必要である。

一方、外部に対する情報提示の方法としては、ウェアラブルディスプレイや電飾ファッションが典型的であるが、その効用については状況や用途に依存する部分が多い。電飾ファッションの心理学的な調査<sup>9)</sup>は、まだまだ初期段階で、一般的な知見は不足している。服飾心理学



図-11 ユビキタス情報ビューアの利用イメージ:ユーザの視界(左),HMD デザイン(中央),バッファローと塚本による HMD モック(右)。物どうしの情報連携が必要である。



図-12 拡張現実感の例:拡張デスクトップ(左)とARペット(右, イメージ図)。空間情報の高度連携を要する。

などの知見を元に、今後の調査、検討を要する。

## 人や社会へのフィッティングに向けて

コンピュータと人間の共生のためには、人間側の使いこなしも重要な要素となる。コンピュータキーボードも携帯電話の文字入力も決して最善のものとはいえないが人間の側が使いこなしてきた。ウェアラブルコンピューティングに関しても、コンピュータの側で完全に人間の意図を察知してユーザの望むとおりに動作させることは、ここ数年のスパンでは不可能である。人間がうまく使いこなせるようなシステムデザインが必要であると同時に、使いこなすための実践を積むことが必要である。

このような観点から筆者は、2001年よりウェアラブルコンピューティングの実践生活を行っている(図-13)。普段の生活の中でウェアラブルコンピュータを利用することは、現時点では不自由な点が多く、見た目の奇異さ、装着のフィット感、行動の妨害、注意の散漫、人体への影響など、シンビオシスに関連する重要な課題がある。また、筆者らは2003年よりNPO法人を立ち上げ、ウェアラブルコンピューティングの実践的な取り組みをチームとして行っている。バイクのレースやイベント、医療などの現場でウェアラブルコンピュータを活用し、そ

の有効性と社会への適応性の検討を行っている(図-14)。使う側の慣れはその有効性に大きく影響することがさまざまなアプリケーションに共通した知見である<sup>10)</sup>。

ウェアラブルコンピュータが社会へ適応するためには、プライバシー、安全性、コストなどの社会的側面を今後つめていく必要がある。ユーザや他の人にどこまで情報が見えるか、どこまで見えているかということとどこまで知っているかというような情報流を管理できる枠組みが必要とされる。逆に社会の側の適応も必要である。インターネットの仮想空間とは違い、実世界の中で両者は共生しなければならないためである。今後の実践を通じて社会の側が学んでゆかなければならない。

## おわりに

ウェアラブル・ユビキタスコンピューティングはこれから10年の間に人々の生活に革命をもたらし、広く浸透するものと想定される。その際、コンピュータが埋め込まれた機器が汎用性、柔軟性を有し、人が装着するコンピュータなどと有機的に連携するために、シンビオティックシステムを構成する必要がある。本稿ではそのための基礎的な要素をいくつか列挙し、その可能性につい



図-13 個人によるウェアラブルコンピューティングの実践。乗り物の中や買い物，講義，食事などの最中にウェアラブルコンピュータを利用している。



図-14 NPO 法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構(チームつかもと)でのウェアラブルコンピューティングの実践的な取り組み。バイクレース，イベント，医療などさまざまな現場でウェアラブルコンピュータを活用している。

て議論した。これはおそらくこれまでにない新しいコンピューティングパラダイムを創出する元となるものと考えられる。実世界における実践的な取り組みを通じた早急なシステムの仕様検討が求められる。

参考文献

- 1) 藤田，塚本：コピキタス環境のための記号処理型言語 LISP を用いた小型コンピュータの設計と実装，情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2006) 論文集 II, pp.897-900 (July 2006).
- 2) Terada, T., Tsukamoto, M., Hayakawa, K., Yoshihisa, T., Kishino, Y., Kashitani, A. and Nishio, S.: Ubiquitous Chip: A Rule-Based I/O Control Device for Ubiquitous Computing, Proc. of Pervasive 2004, pp.238-253 (Apr. 2004).
- 3) 佐野，塚本，義久：コピキタスコンピューティングのためのルール処理エンジン生成機構，情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2006) 論文集 II, pp.661-664 (July 2006).
- 4) 岡田，田川，塚本：ユーザ教示とデータ通信による Q-table の生成機構を有するコピキタス Q 学習エンジンの実装，情報処理学会マルチメディア，分散，協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2006) 論文集 II, pp.657-660 (July 2006).

- 5) 岸野，義久，沼田，板生，塚本，西尾：高度コピキタス環境のためのマイクロジャネットデバイス，電子情報通信学会 2004 年総合大会 通信講演論文集 1, p.491 (Mar. 2004).
- 6) Tsukamoto, M.: Wearable Computing in Daily Life, Proc. of IEEE/IPSJ SAINT Workshops 2004, pp.291-292 (Feb. 2004).
- 7) 小川，塚本，義久，西尾：カメラと加速度センサを用いたポインティング方式の設計と実装，特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告，Vol.1, No.1, pp.78-85 (Mar. 2005).
- 8) Miyamae, M., Terada, T., Tsukamoto, M., Nishio, S., Hiraoka, K. and Fukuda, T.: An Event-Driven Wearable System for Supporting Motorbike Racing Teams, Proc. of IEEE ISWC 2004, pp.70-76 (Oct. 2006).
- 9) 細見，内田，塚本，西尾：衣服と LED の感性評価に関する実験に向けて，特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告，Vol.1, No.2, pp.1-6 (June 2005).
- 10) Tsukamoto, M.: Wearable Computing in Practice, and its Impact on Our Daily Lives in Future, Proc. of 2005 IMFEDK, pp.21-22 (Apr. 2006). (平成 18 年 6 月 29 日受付)