

【特集】実世界インタフェースの新たな展開

8 ウェアラブル インタフェース & センシング

福本雅朗 NTT DoCoMo 先進技術研究所

小さなコンピュータやインタフェース機器を身体に装着する「ウェアラブル」な情報処理は、大きく2種類に分けることができる。1つは「ユーザによる情報アクセス」であり、従来のモバイルコンピューティングの延長にあたる。この場合、日常生活の妨げにならずに、高速な情報アクセスが可能なインタフェースデバイスやインタラクション手法が求められる。もう1つは、同じ「ウェアラブル」でも、ユーザによる明示的な情報アクセスではなく、人体に装着した各種センサデバイスを用いて、継続的に人体の状態や周囲環境のセンシングを行うものである。本稿では、これら2つのウェアラブル情報処理、ならびにそれらを実現するための周辺技術を紹介する。

コンピューティングからインタフェース & センシングへ

1990年代後半から「ウェアラブル(装着型)コンピューティング」ということばが使われるようになってきた。当初は、ポータブル(可搬型)コンピューティングや、モバイル(移動型)コンピューティングの延長として、人体への装着が可能な超小型のコンピュータを製作すること自体が重要な目標であった。

持ち運ぶことができる「携帯」ではなく、身に着けたまま生活ができる「装着」を実現するには、従来のコンピュータに比べて大幅な小型・低消費電力化が必要とされた。しかし、当時の流れは、コンピュータの高速・高性能化であり^{☆1}、CPUは代を重ねるごとに巨大化し、電力消費も増えていった。「小型で低消費電力」なチップは、こうした流れとは逆であったため、本来性能向上が見込まれるはずの最新のプロセスやパッケージを使ったものはほとんど存在しなかった。そのうえ、屋外で利用可能なネットワーク接続手段も普及してはならず、通信速度やレ

スポンスも十分ではなかったため、メールフォルダや辞書など、頻繁にアクセスする必要のあるデータは、(ただでさえ少ない)ローカルなストレージに詰め込んで持ち運ぶ必要があった^{☆2}。そんな中でも研究者たちは、組込み装置向けのSoC(System on a Chip)などを活用して、マッチ箱サイズのコンピュータを製作したり、腰巻き型や手首装着型など、数々の「ウェアラブルな」機器を提案してきた(図-1)。

しかしながら、携帯電話をはじめとしたモバイル情報機器の普及と高性能化が当初の予想を超えた速度で進んだ結果、「小さなコンピュータ」をわざわざ製作する意味が急速に薄れてきた。携帯電話の普及は同時に、モバイル環境でのネットワークへの常時接続も可能にしたため、ローカルな記憶装置に大量のデータを格納して「持ち運ぶ」必要もなくなりつつある。

近い将来、さらに高速・大容量のモバイルネットワークが登場する予定である。こうした状況では、「ウェアラブル・コンピューティング」の概念も従来とは大きく異なったものになる。コンピュータやストレージを「装着」する必要はもはやない。スパコン並みの性能と事実上無限の記憶容量を持ったネットワーク上のコンピュータ群を仮想的に「装着」できる

☆1 ちょうどパソコンやインターネットが一般に普及し始め、アプリケーションの肥大化が加速した時期に当たる。

☆2 回線交換式の携帯電話ネットワークを介していたため、常時接続は(技術的にも金銭的にも)困難であった、という理由もある。



図-1 初期のウェアラブルコンピュータ

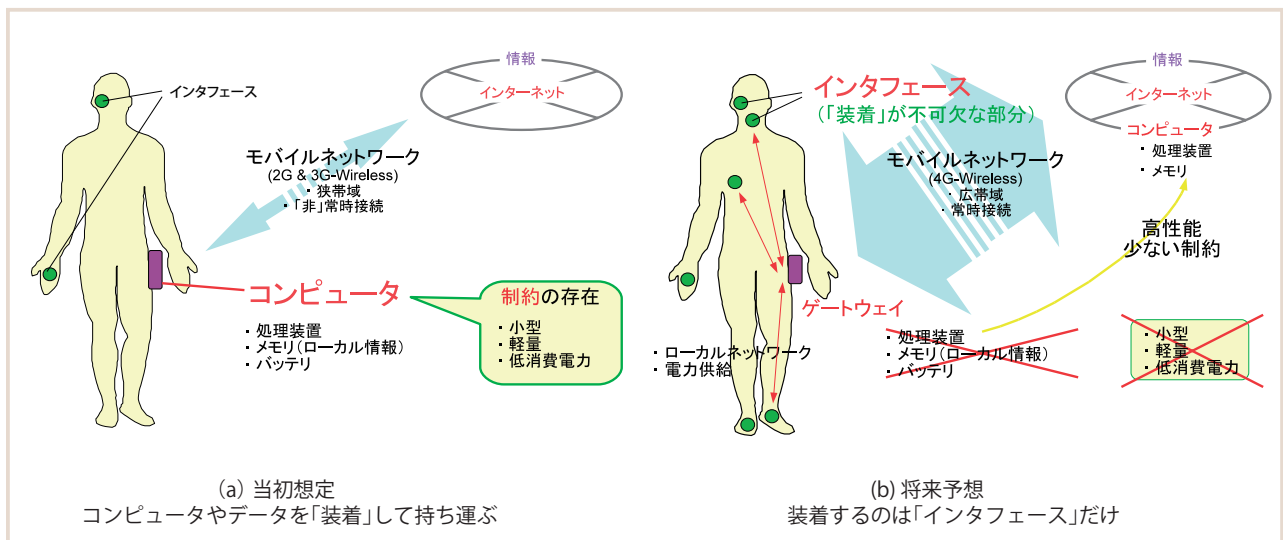


図-2 「ウェアラブル」環境の変化

からである(図-2)。

この場合、最後まで残るものは、オペレータ（人間）の意図をネットワーク側に伝え、逆に情報を人間に提示するための「インタフェース」部分にほかならない。すなわち、「ウェアラブル・コンピューティング」の本質はコンピュータではなく、「ウェアラブルなインタフェース」にあると言えるだろう。

同じ「インタフェース」でも、その目的は大きく2つに分けることができる。1つは「ユーザによる情報アクセス」である。オフィスや家庭のコンピュータで行うのと同じことを、「装着」環境で行いたい、という欲求であり、従来のモバイルコンピューティングの延長に当たる。この場合、日常生活の妨げにならずに、高速な情報アクセスが可能なインタフェースデバイスやインタラクション手法が求められる。

一方、同じようにインタフェース機器を「装着」する場合でも、ユーザによる明示的な情報アクセスではなく、人体に装着した各種センサデバイスを用いて、継続的に人体の状態や周囲環境の把握や認識を行う、という考え方もある。この場合のインタフェース機器は、「センサ(あるいはアクチュエータ)」と言い換えることができる。

以下の章では、これら2つのウェアラブルな情報処理に加え、それらを実現するための周辺技術を順に紹介していく。

ウェアラブル・インタフェース

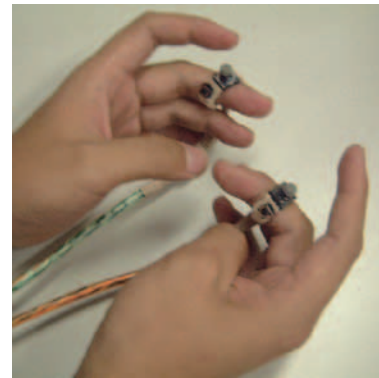
ウェアラブル・コンピュータ研究の初期段階では、コンピュータ本体に比べ、インタフェース機構



(a) twiddle (Handekey)
背面はスティックポインタとシフトキー



(b) FingerRing (NTT HI 研)
和音入力型指輪キーボード



(c) DoubleRing (大阪大)
2本のスティックを倒す方向で文字入力

図-3 ウェアラブルなキーボード

はあまり注目されておらず、従来のキーボードや表示パネルをそのまま小型化して用いることが多かった。「コンピュータ」を構成するCPUやメモリなどの情報処理機構の場合、本体の物理的なサイズを小さくしても使い勝手が悪くなることはない^{☆3}。しかし、コンピュータとオペレータ(人間)との接点である「インタフェース機器」では状況が異なる。人間側の器官(特に指や手などの操作器官)のサイズが一定であることから、装着性を増すための過度の小型化は、使い勝手の悪化を招く場合が多い。

真に「ウェアラブル」なインタフェースを考えた場合、日常生活を支障なく送るためには、身に着けていることすら意識させないレベルにまで小型化を突き詰める必要がある^{☆4}。したがって、ウェアラブルなインタフェース機器には、キーボードや表示パネルなど、従来の機構を単に小型化するのではなく、最初から「装着」を前提として考え直す必要があるだろう。以下に、代表的なインタフェース機器について、装着に適した構造例を示す。

▶ キーボード

キーボードで快適に入力を行うには、指先程度の

キートップ(押しボタン)のサイズが必要であり、操作性を保ったまま小型化するのは困難である。グリップ型のキーボード(図-3(a))は、ボタンの数を減らすことで個々のサイズを大きくしている。歩きながらも比較的安定した入力が可能であることから、黎明期には多く用いられたが、手の大きさ程度の筐体が必要であるうえ、指先や掌を覆ってしまうため、常時装着したまま日常生活を送るのは難しい。

ここで、キーボードを「ボタンを押して情報を入力する機器」ではなく、「指を動かして情報を入力する機器」と考えれば、指の動きを直接検出することで、ボタンサイズの限界を超えることができると考えられる。たとえば、打鍵時に指に発生する衝撃を各指に設置した衝撃センサで検出することで、5本の指での打鍵の組合せによって文字や記号の入力が可能である(図-3(b))¹⁾。このほかにも、指先に設置した加速度センサで指の動きを検出するものや、打鍵に伴う筋電の変化を手首や腕に設置した電極で検出するものなどが考えられる。これらの機器では、検出機構のサイズを縮小しても使い勝手の悪化が起こらないので、工学的に可能な限界まで小型化を推し進めることができる^{☆5}。

▶ ポインティングデバイス

古典的なマウスを「装着」するのは困難である。トラックボールも、ボールを小さくすると転がしにくくなるので、装着に適しているとは言えない。これ

☆3 ただし性能が同一の場合。なお、小型化すれば持ち運びが容易になるので、「使い勝手」としては向上することも多い。

☆4 感覚としては、「携帯機器」ではなく、「アクセサリ」に近い。

☆5 逆に、衣服の側にキーボードを「縫い込んで」しまう方法もある。常に着用されており、かつ広大な「未利用地」を持つ衣服は有効な手段となり得る。

に対して、力(もしくは微小移動)検知式のスティック型デバイスや、光学窓の上で滑らせた指先の動きを検出する方式は、指輪に載る程度に設置面積を小さくすることも可能であり、装着向きだと言える。さらに、同様のデバイスを複数個装着すれば、領域指定などの複雑な操作や、両手親指を用いた文字入力などにも適用できる(図-3(c))²⁾。また、薄くて曲げられるタッチパネルを衣服に縫い込む方法も考えられるだろう。

▶ ディスプレイ

一般的な出力デバイスであるディスプレイパネルも、サイズを小さくすると視認性や一覧性が低下するため、装着性と操作性の両立が難しい。一方、眼球の直前に表示装置を設置するHMD(Head Mounted Display: 頭部搭載型ディスプレイ)や、網膜に直接映像を投射するVRD(Virtual Retinal Display, RID: Retinal Imaging Display とも言われる)方式であれば、小さな表示パネルで大きな視野角を得られるので、日常的な装着使用も可能である(図-4)³⁾。

なお、腹部や額部分などに装着したマトリクス電極に微弱な電流を流すことで、眼を使わずに「触覚」を用いて画像情報を受け取ることも可能である。

▶ 音声入力

音声入力は、手を使わずに利用できるうえ、特別な訓練をすることなく高速入力が可能である。また、超小型のマイクは設置が容易であり、ウェアラブルな入力手段としては理想的だと言える。しかし、周囲に発話音声は漏れてしまうので、狭い空間に多くの人がいる場所での使用は難しい^{☆6)}。オフィスや公共空間、あるいはリビングルームなど、周囲に人がいる状況で音声入力を使うには、「発話音声は周囲に聞こえない」ような手段が必要であろう。たとえば、声帯を振動させない「ささやき声」を皮膚に接触させたマイクで検出する手法⁴⁾が考えられる。このほかにも、皮膚表面に設置した複数の電極によって、「口パク」での発話動作に伴う筋電信号を検出



図-4 Retinal Imaging Display (Brother)

し、発話音声を合成すれば、まったく声を出さずに音声入力が行える。

▶ 画像入力

口顔画像による発話認識、顔面画像による表情認識、あるいは全身画像を用いたジェスチャ認識など、カメラでユーザの姿を撮影して入力を行うインタフェースは多く提案されている。また、当初大型であった撮像装置も、半導体技術の発展によって、今やマイクと同程度にまで小型化されており、日常的な装着使用も可能である。しかし、「身体に装着したカメラで自分自身の顔や身体を撮影する」のは本質的に無理がある^{☆7)}。

一方、カメラを外側に向けて周囲環境を撮影し、状況認識や行動記録に利用するのは効果的である。これを一歩進め、ほぼすべての人が行動記録を行い、また部屋や建物に多数のカメラが(防犯だけではなく、電灯や空調などの環境制御を目的として)設置されている世界を考えた場合、「自分の姿は必ずどこかのカメラに映っている」ことが想定できる。プライバシーを確保したうえで、すべてのカメラをネットワーク化するのは容易ではないが、「カメラを持たずに自分自身を撮影する」ことが可能になる(図-5)^{☆8)}。

☆6 携帯電話のイヤホンマイクやヘッドセットがなかなか日本では普及しない理由でもある。これ以外にも、「一人で喋っているように見え、周囲から浮いてしまう」ことを嫌がる日本人独特の事情もある。

☆7 パラエティ番組のヘルメット装着型カメラのほか、携帯テレビ電話やデジタルカメラの「自分録り」のように「手を延ばして撮影する」手法はあるが、日常的な使用には向かない。

☆8 ただし都市部での生活が前提。

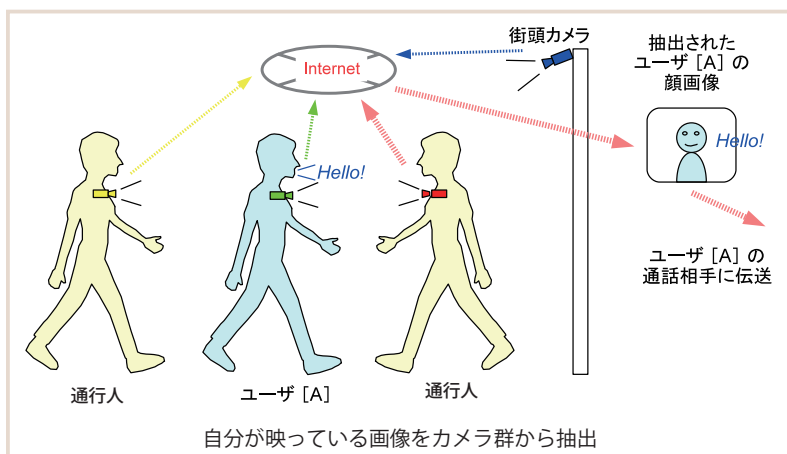


図-5 Wearable TV Phone



図-6 Eye Controlled Earphones (NTT DoCoMo)

▶ そのほかの入力

手・音声・画像以外の(装着検出可能な)入力手段としては、眼や脳波なども考えられる。たとえば視線検出とカメラを組み合わせれば、注視対象の抽出が簡単かつ迅速に行える。HMDなどの眼鏡状機器をすでに装着している場合、フレーム部分へのアイカメラの設置で視線方向の検出が可能である。一方、裸眼やコンタクトレンズ愛用者など、眼鏡を装着したくない人の眼の動きを捉えるには、眼球の動きに伴う電位変化を捉えるEOG (electro-oculogram) 法が利用できる。電極を耳の周囲や耳穴部に設置すれば、顔面を覆うことなく検出が可能である(図-6)⁵⁾。

これまで挙げてきた手法は基本的に身体の「筋肉(随意筋)」を動かして入力を行うものだが、脳波や脳血流量の変化を検出すれば、まったく身体を動かすことなく入力を行える。額部分に設置した電極を用いて、繰り返し計算などの特定のタスクを行った場合などに発生するβ波を検出してスイッチとして動作させるものや、頭部全体から収集した複数チャンネルの脳波を解析して、「右」・「左」などのより具体的な意図を検出するものがある。いずれも現在は手足が動かせない人など特殊用途向けではあるが、日常生活に用いている筋肉をまったく使わずに入力が行えるので、新たな情報アクセスチャネルとしての応用が期待できる。

ウェアラブルセンシングとその応用

ウェアラブルな機器は、ユーザが意図的に情報アクセスを行う目的以外にも利用できる。「装着」によるメリットが特に発揮されるのは、たとえば以下のような場合である。

- (A) 装着者が置かれている状況を知りたい。
- (B) 装着者の人体そのものの状況を知りたい。

(A) の場合、環境側にカメラやマイクなどのセンサを密に配置し、個々のユーザをトラッキングすれば、人体側に何も装着することなく、位置や行動の検出が可能になる。しかし、ユーザ視点の映像や、個々のユーザの発話状況、あるいは体動情報を外部から精度良く取得するのは容易ではなく、インフラの整備コストも膨大になる。これに対して、ユーザの身体に各種センサを装着する手法は、少ないコストで正確な情報を得ることができる。特に、ユーザがナビゲーション(位置情報)やライフログ(ユーザ視点の画像や音声など)の機能を欲している場合、インフラの整備コストをユーザ側が自発的に負担してくれることになる^{☆9)}。さらに(B)の場合、脈拍・血圧・心電図、あるいは血糖値などの身体の状態を

☆9 一方で、すべての機器を装着して持ち歩くのも得策とは言えない。データ通信のための基地局や、位置検出の基準となるビーコンなどが、環境側に適切に配置されていないと、装着しなければならない装置が大掛かりになり、性能も上がらない。「ウェアラブル(ユーザ主体)」と「ユビキタス(環境主体)」は対立する考え方ではなく、相互に補完し合うものと考えられる。



腰部装着カメラで把持物体を撮影

図-7 装着型物探し支援システム(奈良先端大)



体動に加え、皮膚温や心拍数なども測定可能

図-8 LifeMinder® (東芝)

非装着で検出するのは事実上困難である。

(A) の例としては、身体に装着したカメラとマイクに、GPS や WiFi を用いた位置情報を紐づけして、装着者が見聞きした情報のすべてを記録する「ライフログ」がある。仮に一人の人間の一生の動画像を記録したとしても 250TB 程度^{☆10}であり、少し大きめのハードディスクアレイであれば格納可能である^{☆11}。さらに積極的にログを活用する試みも行われている。たとえば、手首や腰にカメラを装着して、手に持った物体を連続的に記録し、音声呼び出し(「車のキーはどこ?」)や類似画像検索などを組み合わせて「最も最近にターゲットの物体を置いた時間と場所」を抽出すれば、どこかに置き忘れてしまったモノを探し出すことができる(図-7)⁶⁾。

一方、(B) の例としては、腕時計状のセンサユニットを装着し、加速度に加え、皮膚温・心拍数・皮膚電気抵抗(GSR: Galvanic Skin Response)を測定するものがあり、装着者の睡眠習慣の可視化などに利用されている(図-8)⁷⁾。生体情報は、健康管理や病気の治療といった直接的な利用のほかにも、GSR を利用した注目シーンのインデクシング(「ハッとした」瞬間の抽出)など、ライフログに代表される超長時間記録データに対する検索の効率化にも使われている。

ウェアラブルの周辺技術

複数個の超小型機器を身体に装着して生活するこ

とを考えた場合、機器間(および機器とネットワーク側)の通信手段の確保、および個々の機器への電源供給が重要になる。

個々の機器が遠く離れた基地局と個別に通信することは、電力消費だけでなく、搭載される電池や電子回路が大きく重くなるために、装着性の悪化も招く。比較的大型の筐体が装着できる腰部などに、4G や WiFi など WAN 側とのゲートウェイ機構を設けておき、個々のインタフェース機器との間で微弱電力通信による PAN (Personal Area Network) を構成するのが望ましい。現在 PAN には、Bluetooth, ZigBee, Wibree などの微弱電力無線が使用されているが、消費電力や拡散性(周囲に情報をばら撒いてしまう)などの面で課題も残る。一方で、機器が身体に「装着」されていることを積極的に利用した方式としては、人体自身を信号の伝達経路として用いる「人体通信(Intra-Body Networking)」がある^{☆12}。電波(Radio Wave)に比べ消費電力を抑えられると考えられるうえ、「触れる」ことで通信が成立するので、秘匿性を上げやすいというメリットもある(図-9)⁸⁾。

もう1つの課題が電源供給である。各機器が個別に電池を持っている現在の方式では、機器数の増

☆10 平均寿命:83 歳, 画像サイズ:QVGA, エンコード:H264 (768kbps)で計算。

☆11 プライバシーや改竄の問題は残るものの、多くの人がドライブレコーダならぬ「ライフレコーダ」を装着して生活するようになれば、事件捜査や裁判の進め方も大きく変わるだろう。

☆12 人体は比較的高い周波数(数百 kHz 以上)に対しては高い導電性を示すので、「電線」のように使うことができる。

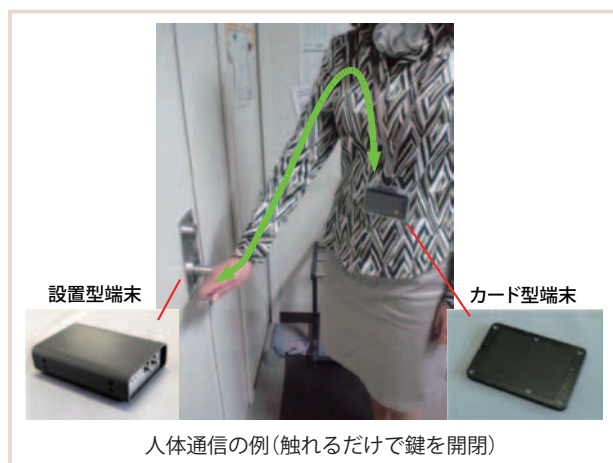


図-9 RedTacton (NTT SI Labs.)

加に耐えられない^{☆13}。解決手段としては、(1) 常に給電(充電)する、(2) 自身で発電する、の2つが主に考えられる。(1)の場合、ワイヤレスでの給電が理想的だが、一般的に知られている電磁誘導方式や磁気共鳴方式には、アンテナサイズや設置位置ずれの問題があり、小型化が強く求められる装着機器への適用は容易ではない。一方、キーボードの節でも述べたように、常に装着している「衣服」の中に電源ラインや回路を「縫い込んで」しまう方法は、水濡れによるショートや洗濯時の耐久性などに課題は残るものの、「装着」を積極的に利用している点で興味深い^{☆14}。

(2)の自己発電では、装着者の身体の動き(運動エネルギー)を電力に変える手法が有効である⁹⁾。歩行動作や腕の振りが比較的多く(数ワット)発電できるが、鞋底や関節など、機器の装着位置が限られるうえに、継続的な発電は難しい。一方で、体表面と大気との温度差(熱エネルギー)を用いた発電は、得られる電力は小さいものの、設置位置の制約が少なく、睡眠中を含めた常時発電が可能である。なお、埋め込み型の機器を目指した発電方法としては、栄養成分であるグルコースを用いた燃料電池が提案さ

れている。

「ウェアラブル」でなくなるときがゴール

現在の機器は、装着していることを意識せずに日常生活を送れるほどには小型化されていない。そもそも「ウェアラブル」という言葉自体が限界を含んでいる^{☆15}。かつて、持ち運ぶには大きくて重すぎる「ポータブルコンピュータ」があったが、日常生活に浸透したのは「ノートブック」という一般名詞になってからである。同じように、我々が小さな機器を常時身に付けて生活するような時代が来たときには、もはやそれらは「ウェアラブル」とは呼ばれなくなっているだろう。

参考文献

- 1) 福本雅朗, 外村佳伸: Wireless FingerRing: 人体を信号経路に用いた常装着型キーボード, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp.1423-1430 (May 1998).
- 2) 中村聡史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: DoubleRing: ウェアラブルコンピューティングのためのポインティングデバイス, DICO2001 論文集, pp.205-210 (2001).
- 3) 渡辺光由: 網膜走査型ディスプレイ(RSD)による立体映像, 画像電子学会研究会予稿集, Vol.220, pp.15-18 (2005).
- 4) 中島淑貴, 鹿野清宏: 非可聴つばやきをインタフェースとするコミュニケーションのためのソフトシリコン型NAMマイクロホンの開発, 信学論, Vol.89-D, No.8, pp.1802-1810 (2006).
- 5) 真鍋宏幸, 福本雅朗: ヘッドフォンを用いた常時装着視線インタフェース, インタラクション2006 論文集, pp.23-24 (2006).
- 6) 上岡隆宏, 河村竜幸, 河野恭之, 木戸出正継: I'm Here!: 物探しを効率化するウェアラブルシステム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.6, No.3, pp.19-30 (2004).
- 7) Suzuki, T. and Doi, M.: LifeMinder: An Evidence-Based Wearable Healthcare Assistant, CHI2001Ext. Abst., pp.127-128 (2001).
- 8) Kado, Y. and Shinagawa, M.: AC Electric Field Communication for Human-Area Networking, IEICE Trans. on Elec., Vol.E93-C, No.3, pp.234-243 (2010).
- 9) Starner, T.: Human-powered Wearable Computing, IBM Systems Journal, Vol.35, No.3, pp.618-629 (1996).

(平成22年4月28日受付)

福本雅朗 (正会員) fukumoto@wearlab.org

NTT DoCoMo 先進技術研究所主幹研究員。1964年生まれ。1988年電気通信大学応用電子工学科卒業。1990年同大学院修士(電子)課程修了。同年、日本電信電話(株)入社。以来、各種インタフェースデバイスの研究に従事。NTT ヒューマンインタフェース研究所を経て、現在NTT DoCoMo 先進技術研究所。工学博士。電子情報通信学会、ヒューマンインタフェース学会、ACM 各会員。

^{☆13} 仮に各機器が1カ月の電池寿命を持っていたとしても、30個の機器を装着している場合、毎日どれかの機器の電池が切れることになる。

^{☆14} 非常に限られた条件下であれば、人体通信を用いた電源供給も可能である。

^{☆15} 頑張れば装着できなくもない、という意味にも取れる。