

ウェアラブルPC

— PCの小型化によるウェアラブルへのアプローチ —

日本アイ・ビー・エム（株）ES事業部
豊川 哲根
中井 真嗣

ウェアラブル・コンピュータの出現 —

1981年に16ビットCPUを搭載した一般向けのデスクトップ型コンピュータが登場して以来、その出荷台数は年間約1億台に達するほど隆盛している。1990年頃にはノートブックPCも現れ、A4、B5、A5と小型化が進むのと同時に、性能面でもデスクトップ型に対して遜色がないまでに向上している。特に日本市場においては狭い住宅環境、混雑した通勤環境も相まって、より小型のPCが強く求められ市場に投入される傾向が強い。この小型化の流れがそのまま進めば、2000年には、さらにサイズ対性能比の高いPCが実現されるものと思われる。

現在普及しているノートブックPCは、液晶ディスプレイとキーボード部がヒンジによって接合され、携帯時に折り畳み、使用時には開いて使用するいわゆるクラム・シェルタイプである。これらは携帯可能なものの、使用に際しては立ち止まってPCの操作に専念する必要がある。

一方でカーネギー・メロン大学やマサチューセッツ工科大学などでは、1990年代初めからウェアラブル・コンピュータの研究および試作がなされてきた。これは常時コンピュータを身につけるスタイルであり、ユーザは立ち止まって液晶ディスプレイ部を開く必要がなく、歩きながらもコンピュータを使用できる。アーキテクチャには独自仕様のものが数多く存在していたが、近年になってようやく、PCのデファクト・スタンダードであるPC/ATアーキテクチャで、Microsoft社のWindowsが稼働する商業ベースのウェアラブル・コンピュータが登場してきた。ただ、これらはまだ大きな市場を形成しているには至っていない。

ウェアラブル・コンピュータはノートブックPCよりも小さい筐体を持ち、体に固定したディスプレイとケーブルで接続されており、携帯や使用に関する制約が少ない。

たとえばディスプレイはいつでも情報の表示が可能のように、ストラップを腕に巻き付ける液晶パネルタイプや、人間の頭部に小さなディスプレイを固定して眼前に画像を表示するヘッド・マウンテッド・ディスプレイ（以下HMD）などが用いられている。

日本アイ・ビー・エム（以下IBM）では1998年9月に、ノートブックPCに匹敵する処理能力と拡張性を備えたHMDタイプのウェアラブル・コンピュータの試作機“ウェアラブルPC”を発表した。本稿ではこれに使用されているさまざまな技術を紹介し、さらにこのようなPCベースの高機能ウェアラブル・コンピュータのアプリケーションと将来性について展望する。

ウェアラブルPCのコンセプトと概要 —

ウェアラブルPCの開発にあたっては、ユーザが払わなければならない犠牲を最小とするために、以下の3点を特に重視した。

- 本体はポケットに入る大きさとする
- Windowsが完全に動作する
- 現在のPCの機能を最大限維持する

まずポケットに入る大きさにしておけば、ユーザは固定のために特別なストラップやブラケットなどの用具を身につける必要がない。ただ、ポケットにもさまざまな大きさがあり、一概には具体的な数字を決めることは難しい。そこでここ2、3年、米国を中心に非常に多く出荷されたPDA（携帯情報端末）である3Com社のPalmPilotを手本にした。この大きさを目標としたのは、PDAは手帳の代わりとして上着のポケットなどに携帯されることを想定し、そのサイズが決められているからである。

近年のPCの普及はWindowsの普及によるところが大きく、このOSを採用すれば、ユーザは新たに特別な操作

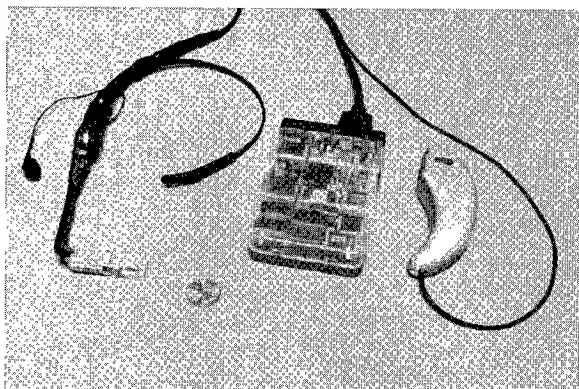


図-1 ウェアラブルPC (左から、HMD、本体、コントローラ)

法を修得する手間が省ける。また、その豊富なアプリケーションソフトウェアと周辺機器の組合せによって、ウェアラブルPCの可能性を拡げることができる。しかしながら、Windowsの要求するハードウェア性能や拡張性を維持するためには、筐体にそれなりの大きさが必要となる。この点でいえばウェアラブルPCにとって、PDAクラスのシンプルなシステムを搭載した方が有利である。しかし今回の大きな目的は、ウェアラブル・コンピュータが持つ可能性を広く正確に把握することにあつたので、処理性能や拡張性をできるだけ高く維持するように心がけた。

HMDは市販品の使用も考えられたが、一般のものはゴーグル型の両眼視タイプであり、これを装着すると外界が見えなくなってしまう。そもそもこれらは、ビデオやDVDコンテンツなどを楽しむための没入型ディスプレイなので、PC用には適していない。そこで、今回新規開発したディスプレイは外界を同時に見ることを可能とし、できる限りの小型化を行った。ディスプレイと外界を同時に見るというのは、ウェアラブルのアプリケーションにおいてきわめて重要である。また一般消費者にも抵抗なく使用してもらうためには、外観が奇異になるのを小型化によって避ける必要がある。

以上の点を踏まえ、ヘッドホンステレオをイメージしてデザインされたウェアラブルPCの写真を図-1に、そのスペックを表-1に示す。回路ロジックはIBMのA4サイズのノートブックPCであるThinkPad 560X（以下TP560X）をベースとし、高密度実装技術と小型拡張ポートの採用などによってPDAサイズを実現している。次章ではその技術の詳細について述べる。

機能項目	ウェアラブルPC	TP560X
CPU	Intel MMX Pentium 233MHz	同じ
2次キャッシュ容量	256KB外部キャッシュ付	同じ
チップセット	Intel 430TX PCI Controller	同じ
メモリ標準/最大	64M Byte / 64M Byte	64M Byte / 96M Byte
ハードディスク容量	340M Byte (1インチ)	4.0G Byte (2.5インチ)
ビデオ・サブシステム	NeoMagic MagicGraph 128XD	同じ
I/O、拡張スロット	USB, IrDA, CompactFlash Type II x1	シリアル, パラレル, FDD, USB, IrDA, CardBus, PCMCIA Type II/I x2 または Type III x1
ディスプレイ	マイクロ・ディスプレイ 256階調白黒0.24インチ TFT液晶320×240ドット	26万色カラー 12.1インチ TFT液晶800×600ドット
外形寸法	26mm×80mm×120mm	297mm×220mm×31mm
ポインティングデバイス	トラックポイント内蔵小型コントローラ	トラックポイント
オーディオ	SoundBlaster Pro 互換	同じ
バッテリー (動作時間)	リチウムイオン (約2時間)	リチウムイオン (約3.5時間)
重量 (ディスプレイ・電池含む)	449g	1900g

表-1 ウェアラブルPCとノートブックPCの仕様比較

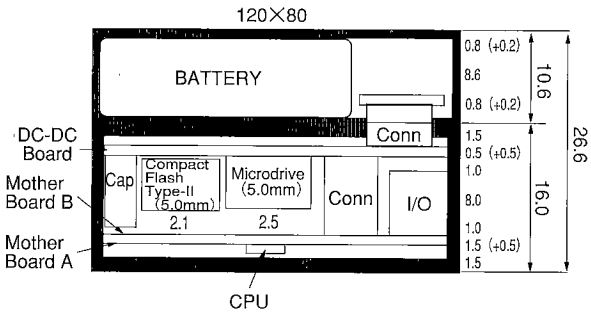


図-2 本体の内部断面図

小型化へのチャレンジ —

高密度実装と多機能・小型拡張ポート

本体のサイズは120mm×80mm×26.6mmで、図-2はその断面図である。厚さのうち10.6mmは着脱可能なバッテリーが占めている。残りの16mm厚分に本体機能が凝縮されており、それを回路系基板と電源系基板の2枚で実現している。基板サイズはどちらも110mm×74mmで、図-3がその写真である。

図-4に示したように、TP560Xと比較すると、この基板サイズは約1/4ときわめて小さい。この小型化が可能に

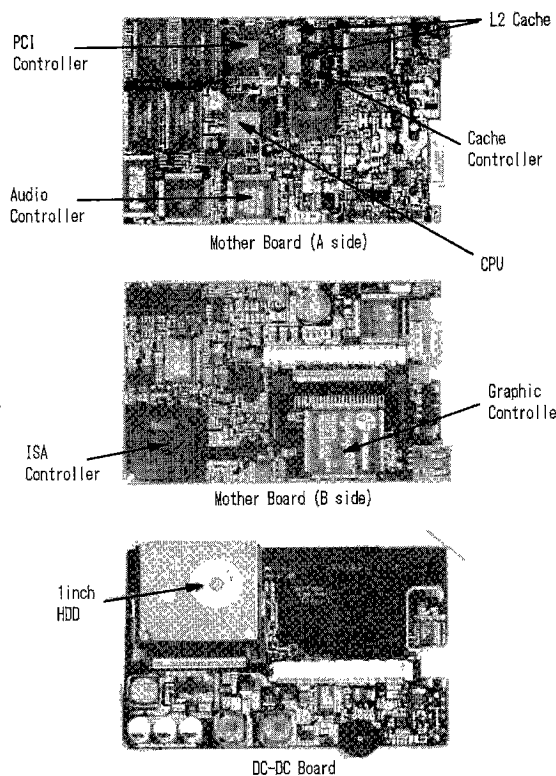


図-3 高密度実装基板

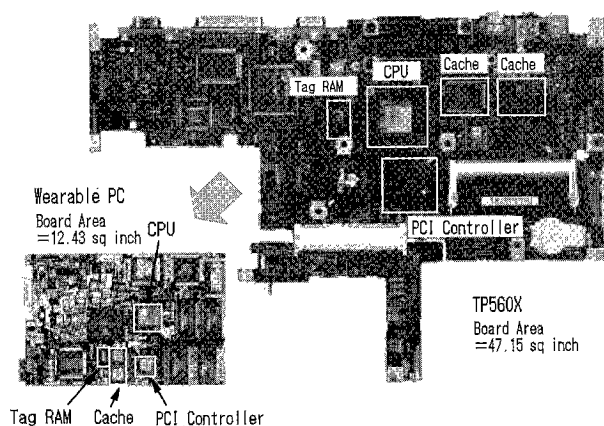


図-4 ウェアラブルPCとTP560Xのマザーボードサイズの比較

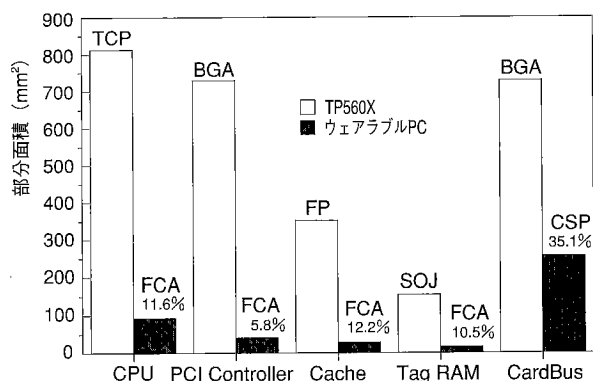


図-5 実装技術による部品サイズの比較

なったのは、

- FCA (Flip Chip Attach) ²⁾ などの小型LSIパッケージ実装
- SLC (Surface Laminar Circuit) ^{2), 3)} の高密度配線によるところが大きい¹⁾。FCAは、通常プラスチックパッケージに封入されているLSI内部のペアチップを直接PCB (Printed Circuit Board) に取り付ける方式である。

これによってチップの占有面積を減らし、実装密度を上げることができる。具体的にはIntel社のMMX Pentium 233MHzとそのメモリコントローラ、およびL2キャッシュがFCAを用いて実装されている。また、CSP (Chip Size Package) と呼ばれる小さなチップ形態が最近普及してきており、ウェアラブルPCではこれをCardBusコントローラに採用している。以上のように、小型のLSIパッケージを実装することで、それぞれの部品の占有面積を図-5に示すように減らすことができた。なお、この基板はペアチップやCSPだけで構成されているわけではないので、さらに基板サイズを縮小する余地が残されている。

さて、これら小型パッケージのLSIから基板に信号線を引き出すためには、基板の配線密度を上げる必要が出てくる。これを解決するのがSLCである。通常のPCBでは層間の配線に全層貫通する穴を開けているが、SLCはPhoto Viaという小さな穴を露光によって1層だけ開けることで配線密度を上げている。基板は10層構成であるが、その8層の信号層のうち4層にSLCを使用して、2層のみ使用しているTP560Xに比べ、より高密度で自由な配線を可能にしている。

またウェアラブルPCでは、基板の高密度実装だけでなく

- 記録装置の小型化
- 拡張ポートの小型化

も重要である。記録装置には、図-6のMicrodrive⁴⁾を用いており、CompactFlash Type IIのフォームファクタ(36.4mm×42.8mm×5.0mm)で340MBの容量を実現している。インタフェースはIDEとCompactFlashの2つを持ち、通常のIDEハードディスクとまったく同様に扱える。また本体にはCompactFlashスロットが1つ備わっており、ここに2基目のMicrodriveを挿入してシステム全体の記憶容量を680MBにすることも可能である。

拡張ポートに関しては、たとえばTP560Xには、シリアル、パラレル、FDD、PS/2、USB (Universal Serial Bus)、CardBusの各ポートが備わっている。ところが最近ではプラグ・アンド・プレイ機能の実現のため、古い規格の拡張ポート(Legacy)で行う接続を、新しいUSBでまかなうことが推奨され、その周辺機器が充実しつつ

ある。たとえば、モデム（シリアル・ポート）、プリンタ（パラレル・ポート）、キーボード・マウス（PS/2ポート）、FDD（専用ポート）、カメラ（パラレル・ポート）、CD-ROMドライブ（専用CardBus）などに関しては、すでにUSB対応のものが現れている。したがってウェアラブルPCではこれらのLegacyポートを省略した。

また最近CompactFlashの規格が標準化され、主にWindows CEのハンドヘルド機に採用されている。元々はフラッシュメモリ専用であったが、Type II規格の出現により、モデムカード、LANカード、SCSIカードなどがすでに登場している。これはノートブックPCのCardBusを置き換えるもので、サイズが1/3程度で済むことからウェアラブルPCではこのCompactFlashを採用した。さらに、ノートブックPCで一般的な赤外線通信機能も装備している。

以上のように、Legacy用のポート（コネクタ）数を減らし、代わりに標準化された多機能の小型ポートを採用することで、ノートブックPCと同じ拡張機能をPDAサイズの筐体を実現することができた。

シースルーHMD

今回開発したディスプレイ⁵⁾の構成とその外観を図-7に示す。表示装置には0.24インチの透過型TFT液晶を用いており、白色LEDがバックライトとなっている。この光学系には偏光ビームスプリッタと呼ばれる光学素子を用いている。これは入射した光の偏光によってその光を直進させたり、90°曲げたりする働きを持つ。具体的にはp-偏光の光を直進させ、s-偏光の光を屈曲させる。そのもとで、TFT液晶を通り抜けた光（p-偏光）は、偏光ビームスプリッタをまず直進し、凹面鏡で拡大されて反射する。ビームスプリッタと凹面鏡の間には1/4波長板が設けられており、これによってp-偏光の光は偏光面を曲げられてs-偏光となる。そのs-偏光の反射光がビームスプリッタで90°曲げられて目に入る。また、偏光ビームスプリッタは外界から目に入ってくる光のp-偏光成分も透過させるので、PC画面と同時に外界も見えるシースルーディスプレイとなる。PC画面は対角線19°の大きさに見えるように設計されている。これは2m先の26インチディスプレイの大きさに相当する。なお、ハーフミラーを用いても同様の機能は実現できるが、この場合TFT液晶から出た光はユーザの目に到達する間に、わずか1/4に減少してしまう。これに対し、偏光ビームスプリッタを用いると、その光学的性質により光をほぼ100%目に入れることができる。

図-7の写真ではHMDの表示部から離れた状態で撮影しているので、画面の一部分しか見えていないが、実際には目を表示部から25mm以内に近づけると画面全体を

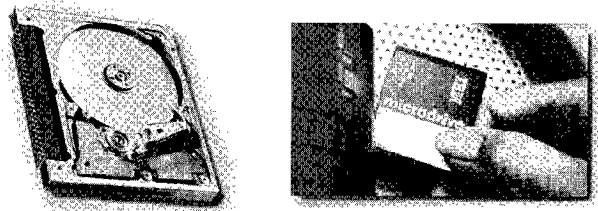
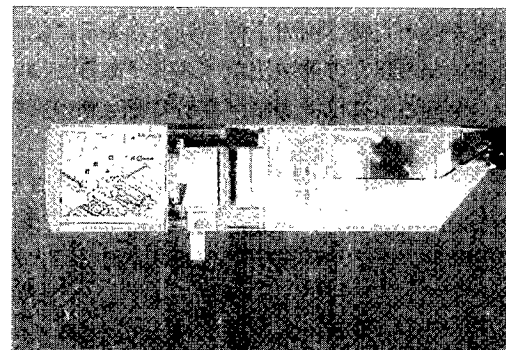
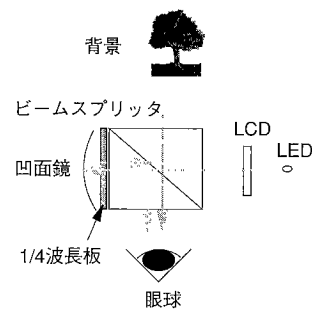


図-6 Microdrive



(表示部 12.7mm×12.7mm×30mm)

図-7 シースルーHMDの仕組みと外観



図-8 インストラクション・アシストの例

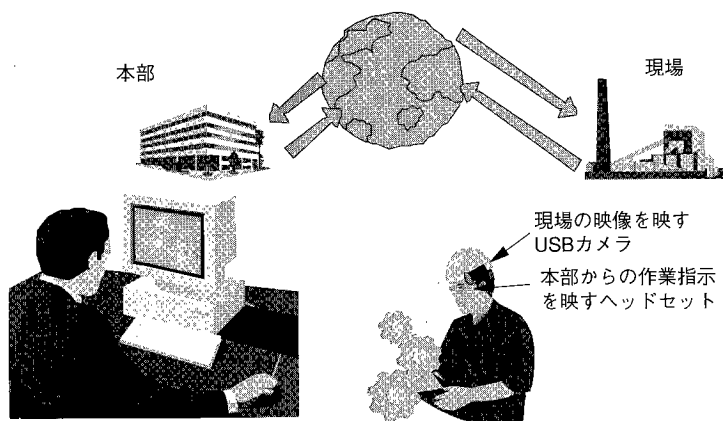


図-9 遠隔地からの映像による作業指示および現場の状況の映像送信

見ることができる。ヘッドバンド分を頭部に装着すれば、表示部が目の前に位置するようになっており、これで大体の位置を決めた後、画面全体が見えるように位置を微調整する。なお現在の着装法がベストであるとはいえないため、今後さらに位置調整が容易で安定感の高い方式を検討していく予定である。

以上、片眼視であることとシースルー機能、さらに比較的小さい画角ときわめて小さなパッケージによって、ユーザの視界を妨げないディスプレイを実現することが可能となった。

コントローラ

ウェアラブルPCの操作にはマウス機能とマイクが内蔵された、片手で握るタイプのコントローラを用いる。マウスポインタの移動にはTP560Xと同じセンサおよびロジックのTrackPointが用いられ、操作用スティックに働いた力の方向と大きさを歪ゲージで検出している。TP560Xではこのスティックはキーボード中央に配置され、人指し指で操作するようになっているが、ウェアラブルPCでは、これを親指で行うようになっている。クリック操作用には2つのボタンを用意しており、通常のマウスと使用法がほとんど同じなので、ユーザは新しい操作系を修得する必要がない。

コントローラに内蔵したマイクは、音声入力によるコマンド制御やデータ入力等に用いることができる。近年のCPUの処理能力向上と相まって、精度の非常に高い音声認識ソフトウェアが広く一般に入手可能となってきている。ウェアラブルPCは元々高いパフォーマンスを持つTP560Xをベースにしているの、IBMがWindows用に

開発した音声認識ソフトウェアであるViaVoiceなどをインストールすれば、すぐに音声認識機能が使用できるようになる。ウェアラブルPCにはUSB経由でキーボードを接続することも可能であるが、身につけるということを考えると、これは少々非現実的である。音声認識を用いれば、テキスト入力やコマンド入力といったキーボードの機能を肩代わりさせることができ、ウェアラブルで重要なハンズフリーオペレーション実現の有効な手段となる。

コントローラのデザインに関しては、ユーザごとに異なるさまざまな大きさの手にフィットすることが求められる。残念ながらこの点ではまだ満足できるレベルにはなく、今後の検討が必要である。

ウェアラブルPCのアプリケーション

現状で考えられているアプリケーションは主に産業用のものであり、その1つは図-8のようなインストラクション・アシストである。このHMDは前述したように外界が同時に見えるので、たとえば工業製品のメンテナンスを行う際に、マニュアルをHMDに表示して実際の対象物と比較しながら作業を進めることが可能になる。

また、これをより発展させたものとして、図-9のように本部と現場を通信回線で結んでの作業指示が考えられる。たとえばマニュアルの記述では対処できない問題が発生した場合など、本部に駐在している専門家に対処方法を求めなければならない。現在は状況を説明する図を書くなり、写真を撮るなりして問題箇所を示し、文書あ

るいは電話での指示を求めることになる。また、指示が返ってくるまでには、ある程度の待ち時間を要する。しかし、ウェアラブルPCにUSBカメラを接続し、本部の端末とビデオ会議ソフトウェアを用いて交信すれば、状況の説明はカメラ経由の映像を用いて行い、本部からの指示も画像ベースでリアルタイムに得ることができる。また、この通信にはCompactFlashの無線LANカードなどを挿入して、現場のLAN経由でインターネットを介して本部と接続すればよい。さらに広いフィールドワークに対して指示を与える場合には、GPSも有用であろう。

このように本体だけでなく、センサや通信装置などの周辺機器を活用することによって、ウェアラブルPCの活用範囲を広めていくことができる。

今後の展望 —

要素技術のさらなる進展

今後、このようなPCベースのウェアラブル・コンピュータを発展させていく上で、次のような展開が考えられる。

• CPU 処理性能の拡大, 省電力化

CPUの処理性能は年を追うごとに高まってきているが、これはウェアラブル・コンピュータにはそれほど寄与しないのではないと思われる。というのも、処理性能の向上につれてCPUの消費電力も増加の一途をたどっているからである。現状では標準のLi-Ionバッテリーでは1.5～2時間しか連続使用できない。発熱の管理についても課題がないとはいえない。したがって、今後のCPUに期待されるのは省電力化である。現在最先端のシリコン・プロセスは0.18ミクロンからそれ以下に向かっている。ウェアラブルPCで使用しているCPUは0.25ミクロンのテクノロジーであるから、このプロセスの革新を処理性能ではなく省電力化に振り向ければ、ウェアラブル・コンピュータにとって望ましい流れとなるであろう。

• ディスプレイの高精細化

今回のウェアラブルPCのディスプレイは解像度が低く、白黒なのでやや貧弱である。しかし、HMDに使用できるサイズで、カラーの高解像度液晶が出現しはじめている。具体的にはVGA (640×480), SVGA (800×600)のものが試作から量産開始段階にある。これらを利用したHMDによって、ウェアラブルPCの画像表示機能は格段に豊かなものとなる。

• ストレージの拡大/通信速度の強化

Microdriveの容量が340MBということもあり、ウェアラブルPCの記録容量は一般のノートブックPCに比べ1桁ほど小さい。しかし、HDDの容量は現在のところ年

に約1.6倍の割合で増加しているので、2000年の時点ではもっと容量の大きいHDDが期待できよう。また、高速な無線通信サービスの一般利用が可能になれば、ウェアラブルPC本体にデータをすべて保持するのではなく、必要に応じてサーバのデータを参照していくという使い方も実用になると思われる。

ウェアラブル・コンピュータの将来について

ウェアラブルPCは、Windowsの動作を可能とした高性能ウェアラブル・コンピュータの1つの形態であり、ノートブックPCの豊富なアプリケーションと周辺機器をそのまま活用できるというメリットがある。

しかしながら、このHMDで画面を見るタイプのウェアラブルPCに、Windowsの操作マナーが最適だとはいえずしもいえない。またアプリケーションにしても、既存のものはウェアラブル用に開発されたものではない。このような点から、まず作業支援アプリケーションのニーズが高い産業界に普及すると考えられる。

今後、インタフェースがウェアラブル用に最適化され、またウェアラブルならではのアプリケーションが出現してくれば、より広いマーケットや一般ユーザへの普及が期待できる。たとえばマサチューセッツ工科大学では、“Augmented Reality”と呼ばれる人間の記憶、思考を補助する研究がなされている⁶⁾。これは備忘録や秘書代わりに状況に応じた情報を能動的に表示したり、あるいはカメラで捕らえた相手の顔を認識し、それを元に個人情報を検索してHMDにオーバーレイ表示するといったものである。このような最新の研究成果と小型で高性能なウェアラブルPCなどを組み合わせていけば、よりウェアラブル・コンピュータの裾野が広がるものと期待される。

参考文献

- 1) 西尾, 石田: ウェアラブル・コンピュータ, 第12回路とシステム (軽井沢) ワークショップ論文集, pp.343-348 (Apr. 1999).
- 2) Tsukada, Y., Mahimoto, Y., Nishino, Y. and Mii, N.: Surface Laminar Circuit and Flip Chip Attach Packaging, Proc. 7th IMC, pp.252-258 (1992).
- 3) 伊田, 西尾: モービルコンピュータの実装技術, 回路実装学会, Vol.10 (1), pp.36-39 (1995).
- 4) Reiley, T. C., Albrecht, T. R., Kuroki, K., Albrecht, D. W. and Aoyagi, M.: Micro Drive A Pluggable One Inch Disk Drive for Portable Devices, Proc. IEEE Int. Nonvolatile Memory Tech. Conf. (June 1998).
- 5) Bassak, G.: As Fine As The Eye Can See, IBM Research, No.4, pp.9-13 (Nov. 1998).
- 6) Starner, T., Mann, S., Rhodes, B., Levine, J., Healey, J., Kirsch, D., Picard, R. W. and Pentland, A.: Augmented Reality Through Wearable Computing, Presence, Special Issue on Augmented Reality, Vol.6 (4), Fall (1997).

(平成11年8月3日受付)