

Tangible Bits: 情報の感触／情報の気配

石井 裕 e-mail:ishii@media.mit.edu
マサチューセッツ工科大学

今日のGUI (Graphical User Interface) の基本概念は30年以上前に生まれた。GUIは情報を“Painted Bits” (ピクセル) としてスクリーン上に視覚化する。このGUIの次にくるHCI (Human Computer Interaction) のパラダイムとして、筆者らは“Tangible Bits” のビジョンを実体化する研究を、MIT Media Labにおいて進めている。Tangible Bitsは、bits (オンライン・デジタル情報) の世界からatomsの世界 (物理世界) への回帰と融合を目指すものであり、tactility (感触) と peripheral sense (気配) を基軸とした、新しいインタフェース・デザインを展開している。本稿では、次世代のインタフェース・ビジョン“Tangible Bits”を、具体的なデザイン例を通して紹介する。そして、我々の肉体が存在する建築空間そのものを、人間とサイバースペースとのインタフェースに変えていくという、新しい方向を提案する。

博物館から未来へ

パーソナル・コンピュータの発明よりはるか昔、時の経過を測り、天体の運行を予測し、建築図面を描き、計算を行うために、人々は多様な道具を作った。これらの特化された道具は、高度な工芸技術と美学に基づきデザインされた。人々はこれらの美しい道具を手につかみ、操作しながら、手と手の中の道具を通して物理世界に働きかけ、同時に物理世界からの情報を、その手を通して感じとった。厳選された材料でできた、これらの美しい道具に、今我々は、博物館でしかめぐりあうことができない。そして人々は今、朝から晩まで平べったい四角いコンピュータ・スクリーンを凝視しつつ、プラスチック・マウスをクリックし、プラスチック・キーをたたき続けている。

デジタルであることの意味を問い、人間とコンピュータとの関係、そしてヒューマン・インタフェースの未来を考えるためには、「それと引き換えに何を我々は失ってしまったのか」を問うことが重要だと考える。だから、歴史的科学的道具 (Historical Scientific Instruments)

の持つ美的水準と豊かなアフォーダンス¹⁾に、そして、それらが学校や研究室、デザイン・スタジオから消え、プラスチック・マウスとスクリーンに置き換えられてしまったことに、私は強い関心を持つ (図-1)。これらの美しい工芸品を手につかみ、操作することにより、パーソナル・コンピュータ以前の人々は、自分の手を通しての現実世界との直接的な接触 (haptics) を尊ぶ、豊かな言語と文化を作り上げたに違いない。しかしながら、この豊かさは、パーソナル・コンピュータに代表される汎用デジタル・テクノロジーの急流に吞まれ、失われてしまった。

Tangible Bits

人間とサイバースペース (オンライン・デジタル情報) とのインタフェースは、現在、パーソナル・コンピュータのGUI: Graphical User Interfaceに限定されている。そこでは情報はすべて、“painted bits”として、四角い平面スクリーン上に輝くピクセルとして表示される。しかし、スクリーン、ウインドウ、マウス、キーボードに縛られた現在のGUIは、我々が住む物理世界におけるインタフェースとは、大きくかけ離れている。我々が、物に直接触れ操作

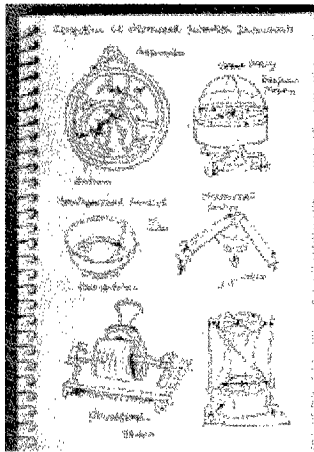


図-1 Collection of Historical Scientific Instruments at Harvard University におけるスケッチ (石井)

することで培ってきたスキルや (たとえば、粘土でモデルを作る), 周辺感覚 (peripheral sense) によるアウェアネス (たとえば, 窓から入ってくる光の量の変化により天候の変化や時間の経過を知る) はまったく活かされていない。

Tangible Bits プロジェクトの目的は, 現在の GUI パラダイムを超える, 人間の感性とスキルに根ざした新しいインタフェース・パラダイムに至る, 具体的な道を示すことにある。Tangible Bits は, サイバースペースと物理世界の間の深いギャップに, ヒューマン・インタフェースの観点から, 新しい橋をかける試みである。そのためには, 現実の物理世界とサイバースペースに存在するデジタル情報との有機的な結合が, 鍵となる。デジタル情報を, 我々の肉体が存在する物理空間を通して直接アクセスできるようにするため, 以下のキー・コンセプトに焦点を当て, 研究を進めている¹⁰⁾。

(1) インタラクティブな表面: 机, 壁, 天井, ドア, 窓などの, 建築空間の表面を, 物理世界とデジタル世界とのアクティブなインタフェースに変換すること。

(2) ビットとアトムとの結合: 手につかみ操作できる物理オブジェクト (graspable objects) とオンライン・デジタル情報をリンクすること。

(3) アンビエント・メディア (ambient media): 建築空間の中の音, 光, 影, 空気の流れ, 水の動きなどの ambient media を, 認知の周縁 (periphery) に位置する, サイバースペースとのバックグラウンド・インタフェースとして利用すること。

図-2 に, Tangible Bits のデザイン・スペースの基軸となる, フォアグラウンド/バックグラウンドの概念を示す。このスペースの中で,

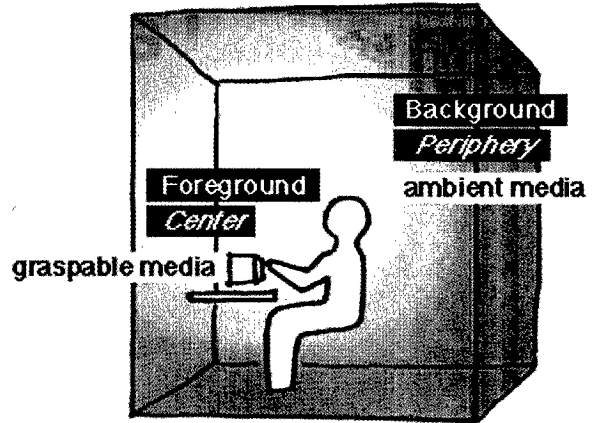


図-2 物理空間における認知の中心と周辺, およびグラスバブル (つかめる) ・メディアとアンビエント・メディアとの関係

(i) デジタル情報を graspable object と結合することにより, 認知の焦点 (フォアグラウンド) において, ビットを直接手でつかみ, 操作できるようにすること, および,

(ii) ambient media を用いることにより, 認知の周縁 (バックグラウンド) において, 情報の気配にアウェア (aware) でいられるようにすること, を目指している。

GUI は注視されることを前提に, 人間の視覚, そしてフォアグラウンドに焦点をあて, デザインされている。しかし, 人間は無意識のうちに, バックグラウンドから多様な情報を受け取り, 処理している。graspable media と ambient media との組合せにより, いかにフォアグラウンド/バックグラウンドの間のスムーズな情報と意識の遷移を可能にするか, そして我々の肉体が存在する建築空間そのものを, いかに人間と情報とのインタフェースに変革するかが, 我々の取り組んでいる研究テーマである。

関連研究

我々の研究は, Ubiquitous Computing, Augmented Reality, さらに筆者の関わった ClearBoard, Graspable User Interface などの研究に強い影響を受けている。ここでは, これらの先行研究との関連を簡単に述べる。

(1) Ubiquitous Computing

Mark Weiser は, 将来, 数多くの多様なデバイスを通して, コンピューティング・サービスが提供されることにより, コンピュータが「透明」になると予測した¹⁶⁾。彼が打ち出した「コンピュータを遍在化させる」という方向に対し, 我々の研究の焦点は, 豊かなアフォーダンスを持ったコンピュータ以前の時代からの「物」や建築の「表面」に, HCI の観点から新しいディ

デジタルの意味を付与することにある。

(2) Augmented Reality

Augmented Reality (AR) の流れは、通常の視聴覚を遮断し、仮想世界への没入を強制する Virtual Reality に対するアンチ・テーゼとして生まれた^{17), 5), 3)}。たとえば、その代表的例である DigitalDesk では、実際の机への直接ビデオ・プロジェクションにより、デジタル文書と紙の文書とを混在して利用できる可能性を提示した。しかし、多くの AR は、デジタル映像の現実映像へのオーバーレイによる、視覚的増強にとどまっている。我々のアプローチは、物を直接つかみ操作することに焦点を置いていることが、特徴である。

(3) ClearBoard

ClearBoard は、分散した2地点の物理空間を、仮想の2次元協同描画空間を間にはさみ込む形で相互結合する、CSCW (Computer-Supported Cooperative Work) のためのシステムである⁸⁾。本プロジェクトを通して、建築空間の壁、床、天井、窓、机などのあらゆる表面を、単なる空間のパーティションから、細胞膜のように仮想/現実空間の間を情報が自由に行き来するアクティブ・インタフェースに変えるという着想を得た。

(4) Bricks: Graspable User Interface

Bricks は、レゴ・ブロックのような、小さな物理オブジェクトで、これを仮想グラフィカル・オブジェクトが表示されている大型のスクリーン上に置くことにより、仮想オブジェクトを直接操作するためのハンドルになる。すなわち、デジタル情報を直接両手でつかみ操作することが可能になる⁶⁾。この仕事が、Tangible Bits プロジェクトにおけるキーコンセプト「graspable media」の出発点になっている。

(5) その他

このほかに、Durrell Bishop の Marble Answering Machine, Natalie Jeremijenko の Live Wire など、本研究に影響を与えたデザイン、およびアートの仕事がある。詳細は文献10)を参照されたい。

Tangible Bits のデザイン例

次に具体的なプロジェクト例として graspable media をデジタル情報の「直接」操作に応用した metaDESK / Tangible Geospace, 人と人のコミュニケーションに graspable media を応用した inTouch, そして ambient media を具体

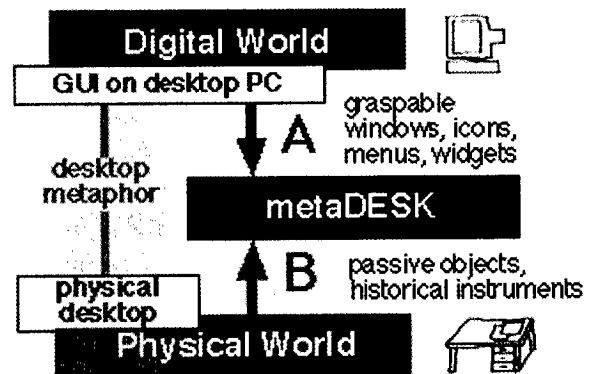


図-3 metaDESK のデザイン・アプローチ

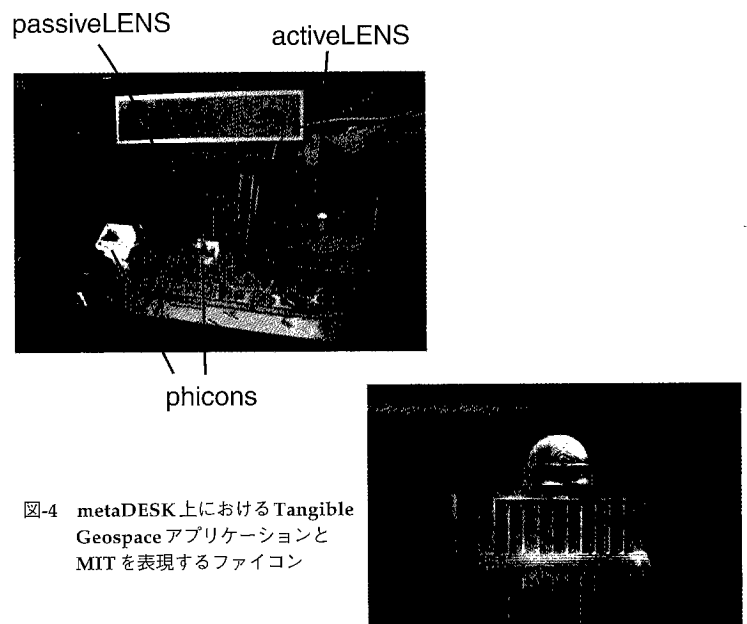


図-4 metaDESK 上における Tangible Geospace アプリケーションと MIT を表現するファイコン

化した水ランプ (WaterLamp) とかざぐるま (Pinwheel) を紹介する。

metaDESK と Tangible Geospace

1981年に発表された Xerox Star Workstation は、GUI を搭載した初めての製品であった¹²⁾。その基盤となる枠組みがデスクトップ・メタファであり、現実の机をビットマップ・スクリーン上で模擬した。その後、Apple Macintosh がこの概念を市場に広めた¹⁾。metaDESK はこの逆を行く、すなわち仮想世界から現実世界に回帰するための、実験的プロジェクトである。そのため、「デスクトップ・メタファ」を「メタファ」として利用し、アイコン、ウィンドウ、メニュー、ハンドルなど、GUI の世界で確立された基本要素に、物理的実体を付与することで、新しいインタフェースの可能性を模索した^{10), 13)}。図-3 に metaDESK のデザイン・

アプローチを示す。

metaDESKは、水平に近い、バックプロジェクション型の大型スクリーン、スクリーン上のオブジェクトを検出するビジョン・システム、アームに接続されたLCDからなるactiveLENS、映像を浮かび上がらせるために透明のガラスファイバーを埋め込んだ木枠からなるpassiveLENS、そしてファイコン (phicon) と呼ぶ物理的なアイコン、から構成される。

ファイコン (phicon) はアイコンの物理バージョン、activeLENSおよびpassiveLENSは、ウィンドウの物理バージョンである。たとえば、図-4に示すファイコンは、MITのシンボルであるGreat Domeをモデルにしたものであり、MITに関する情報を表現 (あるいは概念的に「内蔵」) している。このファイコンをつかみ、metaDESKのディスプレイ上に置くと、metaDESK内部の赤外線カメラとコンピュータ・ビジョン・プログラムがその種別と位置を検出し、その場所にGreat Domeの地図上の場所がくるように、MITの地図情報 (2次元) を表示する。ユーザから見ると、あたかもそのファイコンの中から、地図情報が「漏れだし」机の上全体に拡がったかのように見える。すなわち、マウスでダブルクリックするかわりに、ファイコンをつかんで置くことにより、その中に「格納」されている情報にアクセスしたことになる。このファイコンは、情報を格納するだけでなく、その情報を操作するためのハンドルとしても機能する。MITを表すファイコンをつかみ、移動・回転することにより、机の表面の2次元地図情報 (および後述するactiveLENSに表示される3次元情報) を移動・回転できる。さらに2つ目のファイコン (図-4ではMedia Labを表すファイコン) を置くことにより、デジタル地図情報は、この2地点に置かれたファイコンを介して、両手を使って直接操作 (拡大/縮小、移動、回転) 可能になる。また、activeLENSをつかみ動かすことにより、その位置からのMITキャンパスの3次元情報空間を探索することができる。これは「つかめる3Dウィンドウ」の概念を実現したもので、メタファとしては、宝石鑑定士が使う、拡大レンズに近い。activeLENSに表示される3次元情報は、ファイコンの移動や回転に伴い、デスク上の2次元情報と連動して、変化する。passiveLENSは、それ自体はディスプレイ機能を持たないが、デスク全体がディスプレイであり、かつpassiveLENSの位置をデスクが追跡できるため、映像をデスク上のその位置にはめ込むことにより、あたかも独自の

ディスプレイを持つレンズ (あるいはつかめる2次元ウィンドウ) であるかのように振る舞う。たとえば、このpassiveLENSをつかみ、デスク上の2次元平面上を滑らせることにより、地図情報の隠れた次元、たとえば衛星からの写真映像を、そのレンズの中から見る事が可能になる。

metaDESKは、Tangible Interfaceの可能性を探索するためのテストベッドとしてデザインされた。本プロジェクトを通して、その後の研究の核となる以下のコンセプトを検証することができた。

- (1) デジタル情報の物理表現と両手を使った直接操作を可能にする「ファイコン」、
- (2) ファイコンに格納されているデジタル情報を表示するための「デジタル・シャドウ」の概念 (デジタル情報をファイコンの回りに光や影として投影すること)、
- (3) 複雑な情報空間の理解と操作を容易にするための実体化したツール、「レンズ」。

同時に、インタフェース・デザインの本質的問題点、たとえばファイコン操作の自由度の多さからくる、解釈の曖昧性、などを洗い出すことができた。その詳細は文献13)を参照されたい。その後、これらのアイデアを発展させた“*Illuminating Light*”¹⁵⁾、“*mediaBlocks*”¹⁴⁾などのプロジェクトが生まれた。現在、ホログラフィー・ワークベンチや都市計画、スライド・ソーティングなどのアプリケーションを通して、Tangible Interfaceの有効性と限界を検証中である。

inTouch: 触れる電話

人間同士のコミュニケーション、特に親密な人間関係において、手、および触覚の果たす役割は大きい。微妙な感情の表現は、言語よりも直接触れることで、より細やかに伝わる。inTouchは「触れる電話」のコンセプト具体化したプロジェクトである²⁾。

- (1) 基本アイデア: 「共有物理オブジェクト」と「分散同期物理オブジェクト群」

グループウェア技術の進展と普及により、デジタル情報を、距離を越えて共有・協同操作することは当たり前になった。しかし、物理的実体を持った物の場合、距離を越えてリアルタイムで共有・操作することは、原理的に不可能であった。同時に2人の人間が同じ物体の両端をつかみ、押したり引いたり揺すったりすると、お互いの手を通して情報を直接伝えられる。我々は、このような「共有物理オブジェクト」

の幻想を、距離を越えて提供するというコンセプトを考案した。そして、同一のオブジェクトを共有し、操作しているという幻想を作り出すために、分散した同一に見える複数オブジェクトの動きを同期させる「分散同期物理オブジェクト群」の機構を、センサ技術+フォース・フィードバック技術により実現した。その概念を図-5に示す。

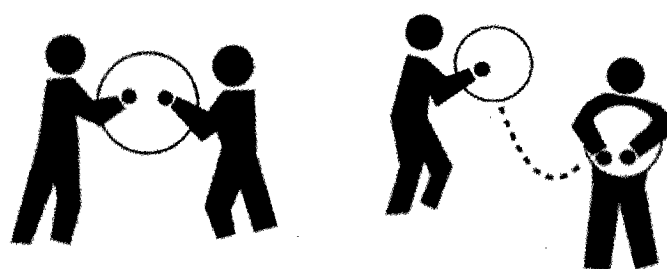
(2) inTouch デザイン

距離を越えて、同一物理オブジェクトを共有操作するというコンセプトを元に、我々は3本の円筒状のローラがベースに埋め込まれた形状のデバイスを考案した。初期のコンセプト・スケッチを図-6に、コンピュータ制御の分散プロトタイプを図-7に示す。

それぞれのローラは、フォース・フィードバック技術により、遠隔にあるデバイスの対応するローラと結合されており、あたかも2人のユーザが同時に「同一」のローラに触れ相手の動きを受動的に感じたり、あるいは積極的にローラをつかんで回し、自分の意図を伝えることができる。受動的な状態と能動的な状態の間をシームレスに遷移できることが、inTouchのインタフェース設計ポイントの1つである。この作品は、昨年9月、オーストリアのリンツで開催された、Ars Electronica '97に招待展示された。

フォース・フィードバック技術は、従来、コンピュータの中に存在するデジタル・オブジェクトに触れるため利用されてきた。inTouchは、この技術を、人間と人間とのコミュニケーションのための、オープン・リンクとして用いた。そして、インダストリアル・デザインの手法を用いて、手で触れて感じる、あるいは手で感情を表現するのにふさわしい、新しい物理インタフェースをデザインした。対応するローラ同士は、振動を抑える、堅いデジタル・スプリング・モデルによって、結合されている。ネットワークを介して利用するために、遅延に対する制御アルゴリズムの工夫を行っている。その結果、LANやインターネットを介して使用した場合でも、精密に相手の動きを感じ、同時に自分の動きを相手に伝えることができる。

人間同士のコミュニケーションにおいて、感情の機微の表現・理解を助けるためには、触覚という新しいコミュニケーションが有効だと、本プロジェクトを通して確信するに至った。技術的にinTouchが必要とするバンド幅は音声や映像のそれに比べると、非常に小さい。しかし人間の手の持つ鋭敏な感覚と「触れる」ことの自然さから、このinTouchは、人にとって、広



(1) 共有物理オブジェクト (2) 分散同期物理オブジェクト群

図-5 物理オブジェクトを介したインター・パーソナル・コミュニケーション

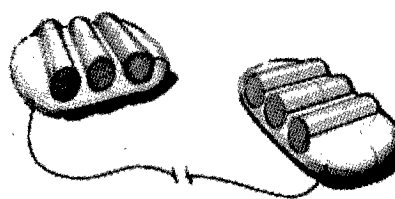


図-6 inTouch コンセプト・スケッチ

帯域で豊かなメディアだということができる。

ビットの気配—水ランプとかざぐるま

metaDESK と inTouch は共に、触覚に焦点を当てたフォアグラウンド・コミュニケーション・メディアであった。この節では、バックグラウンドに焦点を当てた、ambient display mediaとして「水ランプ」と「かざぐるま」を紹介したい⁴⁾。これらのアイデアは、ambientROOM プロジェクト^{9), 18)} から生まれたものである。

(1) WaterLamp: ビットの波紋

人間は、環境の中の微妙な光や空気の動き、環境音により、回りの人々の活動の様子や、気象の変化などを、特に意識を集中することがなくても、察知する能力を備えている。WaterLamp は、このバックグラウンドの認知特性を活かし、他のフォアグラウンド・タスクに集中しながらも、ビット (デジタル情報) のかすかな気配を建築空間の中で感じる、というコンセプトに基づいてデザインされた。WaterLamp は天井を向いた強力なランプ、その上の水槽、そして水面に波紋を作り出すためのPICチップ制御のソレノイドからなる「アンビエント情報ディスプレイ」である (図-8)。ネットから流れ込むビットが、ソレノイドにつながる見えない「糸」を引く。糸が引かれると、あたかもサイバースペースからビットの雨滴が落ちてきたかの

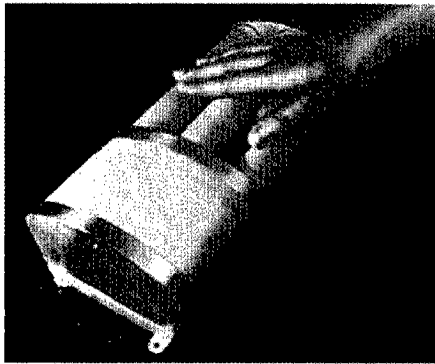


図-7 inTouch プロトタイプ

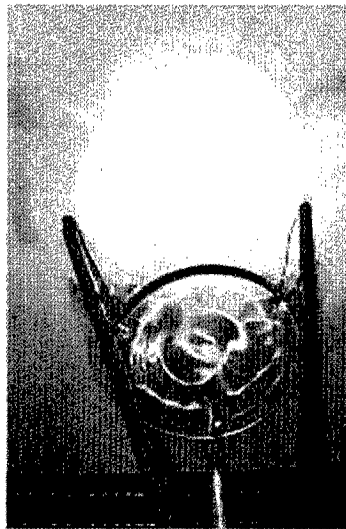
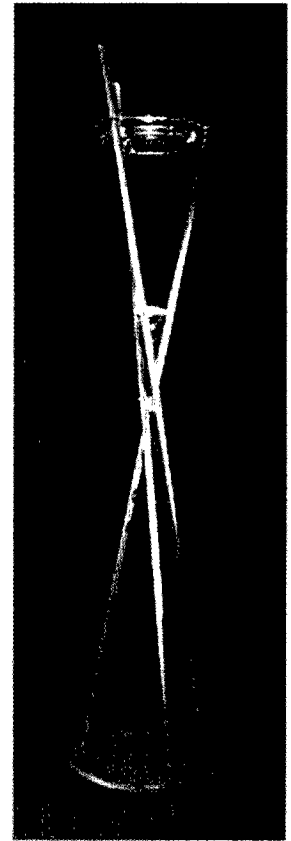


図-8 ビットの雨滴に反応する水ランプ



ように、水面にかすかな波紋が生じ、その波紋の光と影が天井に踊る。建築空間へ、ビットが投影される。

現在開発しているアプリケーションのシナリオは、腕時計と組み合わせた、“ghostly telepresence”である。遠くにいる大切な人が身につけた腕時計が、その人の脈拍を拾い、そのビットをinternetに流し込む。遠く離れたBostonのアパートの居間に置かれたWaterLampにそのビットがたどりつくと、ビットは雨滴となって水面に落ちる。すると、居間の天井にかすかな波紋が広がる。静かに踊る波紋の影は、ソファで新聞を読んでも、視野の周辺で、かすかなアンビエント情報として捉えられ、その人の「気配」が感じられる。従来のオフィスにおける生産性向上を目的としたディスプレイ・システムとは、そのコンセプトが大きく異なる。WaterLampは、人の感性に訴える、物理情報空間のデザインを指向している。

inTouchとWaterLampは、どちらも人間の物理的存在感(Physical Presence)を伝えることができるメディアである。しかし、inTouchは、ユーザが意識してローラに触れ、手で動かすため、常に人の意識の中心にくるフォアグラウンドのコミュニケーション・メディアだった。一方、このWaterLampは意図的な意識の集中を必要とせず、建築環境の中に絶えず情報を放射し続ける。すなわちバックグラウンドのコミュニケーション・メディアである。建築環境と情報空間との融合が、ambient displayのねらいでもある。

(2) Pinwheels: ビットの風

もう1つのambient display mediaが「かざ

ぐるま」である。先のWaterLampは個々のビットを水面に落ちる雨滴にたとえ、その波紋で表現した。しかし、Pinwheelsでは、ビットのマクロな「流れ」あるいは「ビットの風」を表現しようとした。我々の研究室では、図-9のような、かざぐるまが、天井に渡されたパイプに沿って並び、ビットの風を受けて回っている。その回転は精密にコンピュータ制御されており、たとえばメディアラボにおけるローカル・エリア・ネットワークのトラフィックにより、かざぐるまの回転の強弱を制御している。回るかざぐるまを視界の端にとらえられる空間内にいるだけで、ビットの流れ、そして人々の活動を感じることができる。

個人的に興味のある情報ソースは「太陽風」である。もし自分が、太陽のコロナの活動を追いつける天文学者ならば、太陽風を常に、自分の住んでいる建築空間の中に感じていたい。そして、太陽の活動のかすかな変化の予兆を感じとることにより、天文台に泊まり込み集中観測するタイミングを計る。イオン化した粒子である太陽風を、そしてあらゆる情報の流れを、なつかしい「かざぐるま」を回す「風」として物理空間の中で感じていたいというのが、夢である。

ambient mediaのデザインは、認知心理学的に非常に興味深い難題である。どの情報ソース

をどの ambient media にマッピングするか、各個人によるカスタマイズのためのインタフェースをどのようにデザインするか、人はどのように注意を環境に分散させているか、意識の水面下すれすれに情報をとどめておくための調整は可能か、などの問題について、現在研究を進めている。

■ おわりに

物理世界と仮想世界とに2重の市民権を持つ我々は、その2つのアイデンティティをいかに調和させていくかという大きな問題に、今直面している。Tangible Bitsはこの問題に答えるための、ヒューマン・インタフェースの視点からのアプローチである。

人間に根ざしたインタフェース・デザインを考えると、我々の肉体が存在し、接し、それを取り囲む物理空間を無視することはできない。現実世界の物と空間、そして我々の身体との関係を問うことから、新しい方向性が見えてくる。

たとえば「全身運動」を取り入れたコミュニケーション・メディア、“PingPongPlus”¹⁹⁾をSIGGRAPH 98で発表予定している。また、デジタルとフィジカルの2重アイデンティティを持つオブジェクト“Triangles”⁷⁾は、Ars Electronica '97, CHI '98で大きな反響を呼んだ。

Tangible Bitsの研究を進めるためには、従来の狭義の「情報処理」のアプローチは通用しない。建築、インダストリアル・デザイン、機械工学、電気工学、コンピュータ・サイエンス、そしてメディア・アートにまたがる学際的な研究アプローチが不可欠である。幸い、ここMedia Labでは、学問領域の壁を越えた新しい「デザイン」研究を進めるのにふさわしい文化風土にめぐまれている。

本稿で紹介した研究は、Tangible Media Groupの学生、Brygg Ullmer, John Underkoffler, Andy Dahley, Scott Brave, Matt Gorbet, Paul Yarin, Craig Wisneskiらとのコラボレーションから生まれたものである。彼らの貢献に感謝したい。また、本研究に対するMedia LabのTTT (Things That Think) コンソーシアムの協力にも謝意を表したい。

参考文献

- 1) Apple: Human Interface Guidelines: The Apple Desktop Interface, Addison-Wesley(1987).
- 2) Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication, in Proceed-



図-9 ビットの流れを表現する「かざぐるま」

ings of CSCW '98, ACM (Nov. 1998).

- 3) Buxton, W. (in press): Living in Augmented Reality: Ubiquitous Media and Reactive Environments, to appear in Finn, Sellen & Wilber (Eds.), Video Mediated Communication, Hillsdale, N. J., Erlbaum (1997).
- 4) Dahley, A., Wisneski, C. and Ishii, H.: WaterLamp and Pinwheels: Ambient Projection of Digital Information into Architectural Space, In Conference Summary of CHI '98, ACM (Apr. 1998).
- 5) Feiner, S., MacIntyre, B. and Seligmann, D.: Knowledge-based Augmented Reality, Commun. ACM, 36 (7), pp.52-62 (July 1993).
- 6) Fitzmaurice, G.W., Ishii, H. and Buxton, W.: Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces, in Proceedings of CHI '95, pp.442-449.
- 7) Gorbet, M., Orth, M. and Ishii, H.: Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography, in Proc. of CHI '98, ACM (Apr. 1998).
- 8) Ishii, H., Kobayashi, M. and Arita, K.: Iterative Design of Seamless Collaborative Media, Commun. ACM, Vol.37, No.8, pp.83-97 (Aug. 1994).
- 9) Ishii, H., Wisneski, C., Brave, S., Dahley, A., Gorbet, M., Ullmer, B. and Yarin, P.: ambientROOM: Integrating Ambient Media with Architectural Space (vide), in Conference Summary of CHI '98, ACM (Apr. 1998).
- 10) Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, In Proc. of CHI '97, Atlanta, ACM, pp.234-241 (Mar. 1997).
- 11) Norman, D.A.: Psychology of Everyday Things, Basic Books (1988).
- 12) Smith, D.: Designing the Star User Interface, Byte, pp.242-282 (Apr. 1982).
- 13) Ullmer, B. and Ishii, H.: The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces, in Proc. of UIST '97, ACM, pp.223-232 (Oct. 1997).
- 14) Ullmer, B., Ishii, H. and Glas, D.: mediaBlocks: Physical Containers, Transports and Controls for Online Media, in Proc. of SIGGRAPH '98, ACM (July 1998).
- 15) Underkoffler, J. and Ishii, H.: Illuminating Light: An Optical Design Tool with a Luminous-Tangible Interface, in Proc. of CHI '98, ACM (Apr. 1998).
- 16) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, Scientific American, 265 (3), pp.94-104 (1991).
- 17) Wellner, P., Mackay, W. and Gold, R.: Computer Augmented Environments: Back to the Real World, Commun. ACM, Vol.36, No.7 (July 1993).
- 18) Wisneski, C., Ishii, H., Dahley, A., Gorbet, M., Brave, S., Ullmer, B. and Yarin, P.: Ambient Displays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digital Information, in Proc. of International Workshop on COOPERATIVE BUILDINGS, GMD, Darmstadt (Feb. 1998).
- 19) Wisneski, C., Orbanes, J. and Ishii, H.: PingPongPlus: Augmentation and Transformation of Athletic Interpersonal Interaction, in Conference Summary of CHI '98, ACM (Apr. 1998).

(平成10年6月24日受付)