

# タンジブル・ビット —情報と物理世界を融合する, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン—

MITメディア・ラボ  
タンジブル・メディア・グループ 石井 裕  
ishii@media.mit.edu  
<http://tangible.media.mit.edu/>

## はじめに

「仮想」という言葉で呼ばれてきたオンライン・デジタルの世界は、パーソナルコンピュータ、PDA、携帯電話の遍在化と、常時オンのネット接続により、「現実」の日常生活の基盤に深く食い込んだ。その結果、「現実」と対比してあえて「仮想」と呼んだ二極対立構造的な世界観は、自然消滅しつつある。

一方、オンライン・デジタル世界（仮想）と、物理世界（現実）との境界面の「ユーザ・インタフェース・デザイン」の観点から見ると、依然はっきりとした不連続面が存在している。仮想世界は、グラフィカル・ユーザ・インタフェース（GUI）によって規定される「ピクセル」主体の世界であり、スクリーン、キーボード、マウスによって構成される標準的な「ガラス窓」からしか覗くことができない。しかし、ビジュアルに変幻自在なピクセルを操ることで、GUIは多様な機能を視覚的にシミュレートできる「汎用性」をもたらした。これが、GUIの大きな成功の要因となった。

「タンジブル・ビット」はGUIと異なる新しいユーザ・インタフェース・デザインのためのパラダイムを目指すための研究アプローチである<sup>5)</sup>。物理世界を「メタファ」としてグラフィカルにシミュレートするのではなく、物理世界そのものをインタフェースに変えることが、その究極の目的である。その基本的なアイデアは、情報に物理的表現を与えること、それによりスクリーンの内側で光る点（ピクセル）ではなく、ユーザの身体空間の中で、2本（あるいはそれ以上）の手をつかって情報を直接操作可能にすることにある。情報に物理的実体を与え、直接触れて感知・操作できるようにするという目的から、これをタンジブル・ユーザ・インタフェース（TUI）と呼ぶ（「タンジブル」＝「触れて感知できる実体がある」）。

本稿では、TUIの基本理念を、情報の表現と操作の視点からGUIと対比して説明し、一連のTUIのデザイン例を紹介する。

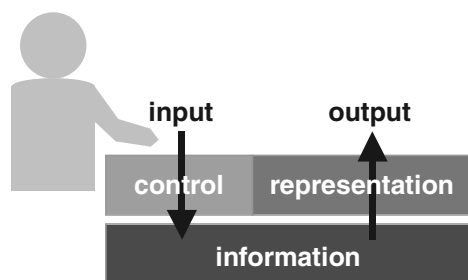


図-1 ユーザ・インタフェース・モデル

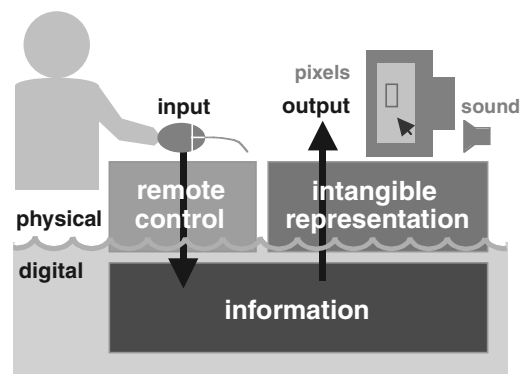


図-2 グラフィカル・ユーザ・インタフェース (GUI) のモデル

## タンジブル・ユーザ・インタフェースの 基本モデル

情報操作のためのインタフェースを構築するためには、以下の2つのキー・コンポーネントが不可欠である(図-1)。

- 1) 人間がその感覚器を用いて知覚可能な情報の外部表現(出力), および
- 2) 人間がその手や体を用いて情報を操作可能にするための制御機構(入力)。

プログラミング言語Smalltalk-80の中で提唱・実現された「Model-View-Controller」のソフトウェア・モデルを、GUIの基本概念を記述するモデルに拡張したものを図-2に示す。それに対比して、TUIのモデルを図-3に示す。

グラフィカル・ユーザ・インタフェース(GUI)(図-2)の特徴は、表現(representation)は「インタangible」なピクセルとサウンドであり、入力(controller)のみが「タンジブル」であること、さらに、その入力機器はテレビのリモコンと同様、汎用的にできていることにある。

一方タンジブル・ユーザ・インタフェース(TUI)(図-3)は、触れて感知できる「タンジブル」な情報表現を用いることにより、表現(出力)メディアそのものを直接操作(入力制御)のメカニズムとしても利用できることが特徴である。さらにインタangibleな情報表現(たとえばビデオ・プロジェクションによるデジタル・シャドウ)とタンジブルな情報表現(たとえばビルディングの物理モデル)とを、シームレスに組み合わせることにより、ダイナミックでより直接的なインタラクションを可能にする。このタンジブルな外部表現に対するユーザの操作は、センサ技術を用いて追跡され、コンピュータ内部のデジタル情報と計算モデルと密に結合している。

### タンジブル・ユーザ・インタフェースの特徴

#### ■直接操作性—入力空間と出力空間との一致

GUIにおけるインタラクションは、「リモート・コントローラ」(たとえばマウス)による「間接的」な操作であり、かつ視覚・聴覚的なインタラクションに限定される。一方TUIは、タンジブルな情報の外部表現を、インタラクションのための物理的制御メカニズムとしても同時利用することにより、情報と計算に対する直接操作性を飛躍的に高め、かつ個々の情報特有な触覚的

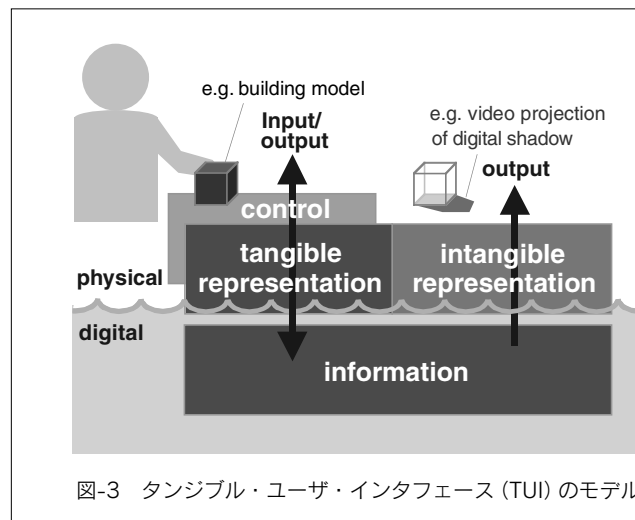


図-3 タンジブル・ユーザ・インタフェース (TUI) のモデル

なフィードバック(受動的あるいは能動的)をインタフェース・デザインに活かすことを可能にする。この直接操作性の向上には、「タンジブルな表現=制御」というTUIの原理から導かれる「入力空間と出力空間との一致」という特性が、大きく貢献している(後で紹介する、「カーリーボット」と「インタッチ」は、入力と出力の完全な一体化、およびアクティブなフォースフィードバックを取り入れた、TUIの例を示している)。

#### ■タンジブルな表現とインタangibleな表現とのシームレスな融合

情報の物理的的外部表現の大きな欠点は、内部のデジタル情報の変更に応じて、外部の物理表現(たとえば形、大きさ、色)をダイナミックに変更することが、GUIのピクセルの変更に比べて著しく技術的に困難なことである。この問題を解決するために、TUIでは、タンジブルな物理外部表現と、インタangibleな表現(たとえばビデオプロジェクション)を同じ空間に重畳させ、シームレスにつながったハイブリッドな情報表現として、両者を積極的に組み合わせて利用する。たとえば、後で紹介する「アープ」や「クレイ」システムにおける、ビルディングや景観の物理モデル(タンジブルな表現)と計算されたデジタル・シャドウ(インタangibleな表現)の組合せが、その好例である。TUIの成功の鍵の1つは、タンジブルとインタangibleな表現が、知覚的に「1つ」の連続した情報表現として、ユーザに認知されるかどうかにある。

#### ■専用インタフェース

GUIと異なり、TUIは「汎用的」なインタフェースを

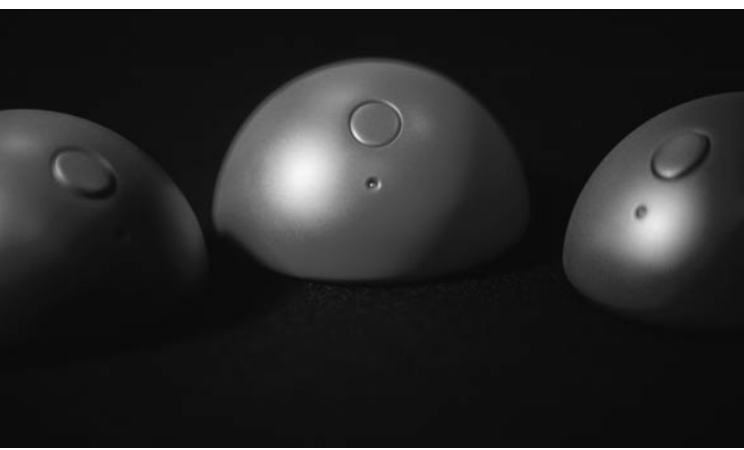


図-4 カーリーボット (Curlybot)

目指してはいない。TUIは特定のアプリケーション・ドメインにおける操作性向上を目的に、特化されたインタフェースを指向している。特に、そのドメインにおいて、人々が、すでに長年にわたって培ってきたスキルや経験（たとえば、都市計画における物理モデルの使用）を活かし、物理的表現の直接操作性や直感的な理解容易性のメリットを基礎に、デジタルの力により、さらにそれらのメリットを増大させるというのが、基本理念である。コンピュータが普及する以前に、物理的な表現メディアやツールを使って培われてきた技や経験をベースにし、それと連続性・親和性を保ちながら、デジタルの機能を自然なかたちで取り込むことを、TUIは狙っている。

#### ■マルチユーザ・マルチハンド・インタラクション

TUIの最も重要な特徴は、空間的に多重化された入力 (space-multiplexed input)<sup>2)</sup>を自然なかたちで支援することにある。それぞれのタンジブルな情報表現は、それ独自の空間を占める専用の制御装置として機能するため、両手を使った平行操作、複数のユーザによる同時並行的な処理を、自然なかたちでサポートすることができる。一方GUIの場合、時間的に多重化された入力 (time-multiplexed input)を提供しているため、ユーザは1つの入力デバイスを、異なる多様な制御機能の間で時系列的に切り替えながら、一時に1つの機能を実行するために使用しなければならない。

TUIの基本コンセプトの有効性を実証するとともに、そのデザイン原則と、適用領域を見極めるため、筆者らのチームは1996年から、多様なTUIプロトタイプをデザインし、実験を行ってきた。ここでは、その中から5つの代表的デザイン例を紹介する。

#### ■駆動力を持った、入出力一体型TUI

入力と出力との完全な一体化と、フォースディスプレイ技術による物理的な動きを表現出力とするTUIの例を2つ紹介する。これらのTUIでは、「インタジブル」な表現はなく、すべてがタンジブルな物理的媒体でのみ成り立っており、「純粋なTUI」ということができる。

##### •カーリーボット (Curlybot)

カーリーボットは、物理的な動きを記録し、プレイバックする教育用の玩具である。ユーザがカーリーボットを掴んで記録ボタンを押して平面上で動かすと、カーリーボットはその動いた軌跡をメモリに記録する。再生ボタンを押して放すと、カーリーボットは休止や加速、記録時のユーザの手の震えまで含めた複雑なオリジナルの動きを、繰り返し再現する。このデバイスは、子供たちの幾何学的な思考を助け、と同時に情緒的なジェスチャ表現を支援する<sup>3)</sup>。

カーリーボットは、Phil Freiによりデザインされ、Victor Suの協力を得て、1999年に最初のプロトタイプが実現された(図-4)。このプロジェクトは、純粋で最もシンプルなフォームのTUIを追求したということの他に、教育のためのコンピュータ玩具の応用という点でも意義がある。

インタフェースの観点から見ると、カーリーボットには入力と出力の境界がまったく存在していない。タンジブルなカーリーボットとそのものの動きが物理的情報表現であり、同時にジェスチャを記録するための入力機構でもある。後述するインタッチ・プロジェクトで開発されたフォース・フィードバック技術を、記録とプレイバックに応用している。

教育の観点からは、カーリーボットは子供たちが数学的な概念を理解するための新しい手法を提供している。子供たちが、直接カーリーボットを掴んで動きを教えることにより、身体の動きと高位の概念(たとえば幾何学)との間に強い関係が生まれ、それが学習を助ける。LOGO言語におけるタートル・グラフィクスと同様の概念を、コンピュータを使ってプログラムすることなく、単純に玩具を動かすだけで、学ぶことが可能になる。

• インタッチ (inTouch)

インタッチは、触覚を使った、インター・パーソナル・コミュニケーションの新しいかたちを探索するためのメディアである。インタッチは、フォース・フィードバック技術を用いて、人々が距離を隔てて、同じ物体を操作しているという幻想を作り出している。その原理を「分散共有物理オブジェクト」(Distributed Shared Physical Objects)と呼ぶ。共有されたオブジェクトは、遠く離れたユーザとの間の触覚通信のリンクとして機能し、物理的な動きを通して情報の発信と受信を同時可能にする<sup>1)</sup>。

同じ形状をしたペアのインタッチデバイスは、それぞれ3本ずつ自由に回転するローラを備えている(図-5)。フォース・フィードバック技術により、それぞれのローラと対応するローラが同期制御されている。片方のデバイスのローラが回転すると、他方のデバイスの対応するローラが同様に回転し、両方の機械的状態を同期させようとする。両方のローラが逆方向に回転させられると、「デジタル・スプリング」の機能により、抵抗力を感じる。この機構を用いて、触覚と抵抗力を用いて、離れたユーザが、その存在を互いに感知することが可能になる。インタッチでは、木でできたローラが、入力デバイスであると同時にフォース・ディスプレイにもなっており、カーリーボット同様入力と出力の境界がまったく存在しない、純粋なTUIの形態だといえることができる。さらに、インタッチでは、触覚をコミュニケーションに応用しているため、情報を送りながら、同時に相手からの情報を手のひらを通して感知することができる。この同時双方向性が、触覚を用いるインタッチの特徴である。図-6に、インタッチを説明する拡張TUIモデルを示す。

インタッチは、Scott BraveとAndrew Dahleyが1997年に初期のコンセプト・デザインと実装を行い、1998年にPhil Freiが新しいデザインを行い、Victor Suの協力を得て多くの実験用プロトタイプを実現した。

■ タンジブル・デザイン・ワークベンチ

専門家によるデザインを支援するワークベンチとして、我々は、「未来の机」のプロトタイプを作り、実験を行ってきた。その特徴は、タンジブルな情報表現(つかめるモデル)とインタンジブルな情報表現(ビデオ・プロジェクション)を組み合わせることにある。1996年に試作した、metaDESK(メタデスク)にはじまり、illuminating light(ライト)、Urp(アープ)、Sensetable(セン



図-5 インタッチ (inTouch)

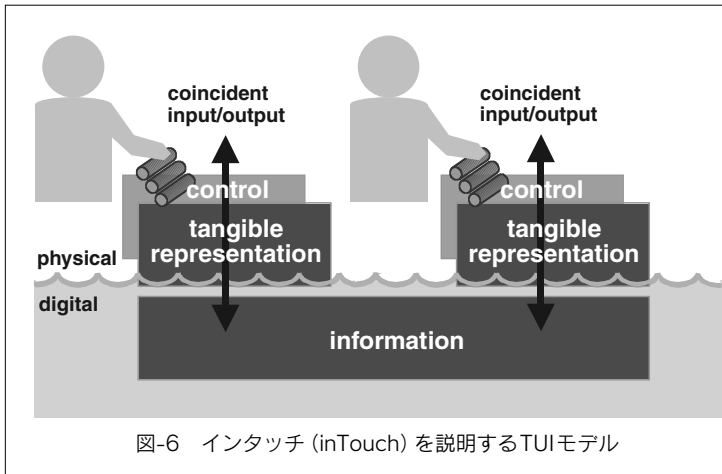


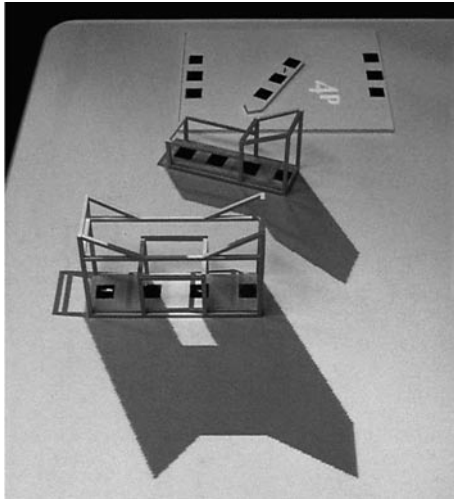
図-6 インタッチ (inTouch) を説明するTUIモデル

ステーブル)、Illuminating Clay(クレイ)などを開発し、実験を行ってきた。この中から、「アープ」と「クレイ」の2つのプロジェクトを、紹介する。

• アープ (Urp)

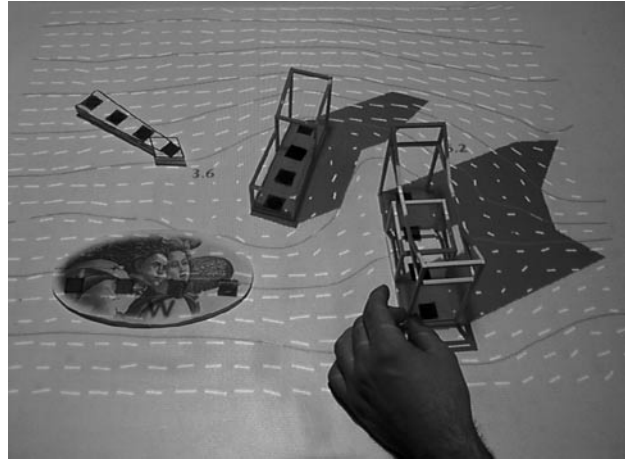
都市計画のためのワークベンチにTUIを応用したが、アープ(Urp)である。アープは、John Underkofflerが、1999年にPh. D. thesisの中で考案した、「入出力電球」(I/O Bulb)というコンセプトを検証するためのプロトタイプの一つとして、実現された<sup>7)</sup>。

I/O bulbは、建築空間の表面、およびその上でのモノの操作に、新しいデジタルの「意味」を付与する「電



(a) 影のシミュレーション

ビルの物理モデルが、デジタルの影を落として  
いる。時計の針を回すことにより、時刻(太陽の位  
置)を変えることができる。ビルのモデルを動かす  
と、影もそれに連れて動く



(b) 風のシミュレーション

風の方向を指示するオブジェクト(楕円形)と、風速を測定するオブ  
ジェクト(杖状)を使って、風の影響を分析する例

図-7 アーブ(Urp) 都市計画のためのTUIワークベンチ

球」として考案された。エディソンが100年以上前に発  
明した「電球」は、 $1 \times 1$ ピクセルの光を投射して部屋を  
明るくするデバイスであるのに対して、I/O bulbは、高  
解像度でかつ双方向の光の流れを生み出すデバイスで  
ある。建築空間の表面からの光子を集め、ドメイン知  
識(たとえば都市計画)を使って、その光のパターンを  
「解釈」し、そのアプリケーションにマッチした「ディ  
ジタルの影と光」を計算して、物理空間に投射する(図-  
7)。

都市計画への応用例(Urp)では、建築の物理モデルを  
I/O bulbの照らす机の上に置くと、コンピュータが計算  
した影が投影される。「時計」の針を回すことで影の動  
きを調べたり、光の反射をシミュレーションできる。  
さらに地上での風の流れを視覚化し、「風速計」を置く  
ことにより、任意の地点での風速を測ることができる。  
I/O bulbを使って物理モデルに、リアルタイムのコンピ  
ュータシミュレーションの結果を投影することにより、  
デジタルに表現された都市空間を、自分の身体のある  
空間と連続した世界で理解・直接操作することが可能  
になる。

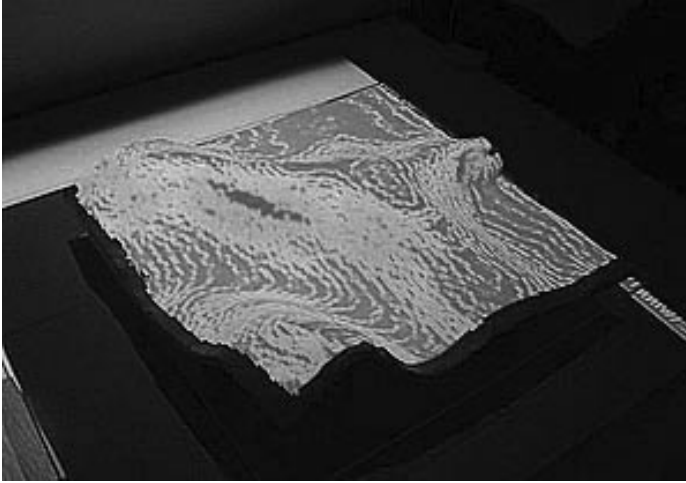
I/O bulbのプロトタイプは、ビデオカメラとビデオプ  
ロジェクタのペアから構成されている。机上のオブ  
ジェクトに光学的なタグを付加し、それをコンピ  
ュータ・ビジョン技術を用いて認識追跡している。計算さ  
れたデジタルの光や影は、ビデオプロジェクタによ  
り机上に投影される。その投影位置を正確に調整する

ことにより、あたかも机上のオブジェクト自身が影を  
落としたり、光を反射しているかのような、幻想を作  
り出すことに成功している。

「従来のGUI(グラフィカル・ユーザ・インタフェ  
ース)に比べ、TUI(タンジブル・ユーザ・インタフェ  
ース)が、現実の仕事において、本当により大きなメリ  
ットをもたらし得るのか?」という疑問に、はじめて明快  
に答えることができたのが、このUrpである。I/O bulb  
という概念の発明にとどまらず、具体的にその有効  
性・優位性を示すことのできるアプリケーション分野  
(この場合は都市デザイン)を見出し、デモすることで、  
タンジブル・インタフェースの可能性を広く理解して  
もらうことができた。

また、タンジブル・インタフェースをデザインする  
にあたり、何に物理的実体を付与し、つかめるモノと  
して表現するか、何をデジタル・イメージのまま表  
現するかという判断が重要となる。両者をいかに有機  
的に結合させ、デジタル世界と物理世界の境界を透  
明にするかが、インタフェース成功の鍵となる。この  
問題に対し、Urpのビルディング・モデルが投げかける  
デジタル・シャドウ(ビデオ・プロジェクション)は、  
1つの明快な回答を提示している。

さらに、このプロジェクトのコア・コンセプトであ  
るI/O bulbは、「建築空間の何百、何千という電球をI/O  
bulbに取り替えたなら、どのようなインタラクション・デ  
ザインが可能になるか?」というまったく新しい問いを



(a) 粘土により作られた景観モデルの地形の変化を3次元レーザースキャナでリアルタイムにコンピュータに取り込み、斜面の角度の計算結果を色づけして投影した例



(b) 粘土による3次元物理モデルに対する投影に加え、垂直壁面へ3次元ビューを投影して使用している例

図-8 クレイ (Illuminating Clay) 景観デザインのためのTUIワークベンチ

投げかけることで、机の表面にとどまらず、建築空間全体を、新しいデジタル・デザインと統合できる可能性を示すことに成功した。

このUrpシステムは、2000年から、MIT都市計画学部の学生のプロジェクトに実験的に使用されてきている。

#### • クレイ (Illuminating Clay)

Urpシステムは、離散的なオブジェクト（たとえばビルのモデルや風速計）の空間的位置関係の直接操作をもとに、日照や風の流れのシミュレーションを可能にした。しかし、個々のビルのモデルの形状は、あらかじめ定義され、コンピュータの中にデジタル・モデルとして入力されていることが条件となっており、Urpを用いたデザイン・セッションの途中で、その形状（たとえばビルの高さや屋根の勾配）を動的に変化させることはできない。変化させられるのは、2次元平面上の位置と方位だけである。

しかし、デザインの上流工程においては、物理モデルの形状自体をユーザの手でダイナミックに変化させながら、理想に近い形状を探し出す、試行錯誤的なプロセスが重要となる。それを支援するTUIは、刻々と変

化する物理モデルの形状を捉え、それに応じて適切な計算結果を投影することにより、デザイン・プロセスを支援することが期待される。

Illuminating Clayはこのような背景から、粘土を用いた景観デザインに焦点を当てて開発されたシステムである。Illuminating Clayのユーザは、伸縮性に富んだ粘土を変形させながら、3次元的な景観モデルを作る。その3次元形状を、天井に装着されたレーザ・スキャナがスキャンし、Digital Elevation Modelをコンピュータ内に生成する。そのModelを元に、ユーザの選択により、高度情報、等高線情報、斜面の傾斜角情報、水の流れや浸食情報、ある地点からの視界情報、日照と影などの情報を、リアルタイムに計算し、その結果を、直接クレイモデルの上に投影する<sup>6)</sup>。

その結果、クレイは、入力と出力空間が一体化し、なおかつ物理形状を直接変更できるTUI「連続体」として機能する。Urpとは異なり、クレイ自体は一切タグが付いておらず、個々のオブジェクトとして認識されることはない。コンピュータからみると、あくまでも物理的な連続体のその3次元形状だけが、入力情報として



図-9 ミュージックボトル (musicBottles) (ジャズボトル)

利用される。

このシステムの大きな特徴は、コンピュータを用いない、従来のクレイ・モデルを使った景観デザインの手法との連続性にある。クレイの形状を変えるとすぐ、新しい計算結果が直接投影するため、ユーザは、従来のクレイモデルを使用した時とまったく同じスキルを使ってモデルを手で直接操作できるメリットの上に、モデルの形状に基づく、非常にパワフルな計算機支援をリアルタイムで受けながら、グループで景観デザインを進めることが可能になる。本システムは、Ben PiperとCarlo Rattiが考案し、Yao Wangのプログラミング協力を得て2001年秋に実現した。MITにおける2002年の都市計画のコースで、実験的に試用する予定である。

UrpとこのClayとを対比すると、オブジェクト指向のCADドローイング・ソフトと、ビットマップ指向のスケッチ・ソフトの違いに似た関係を見出せる。都市計画や景観デザインは、その上流工程と下流工程においては、情報の構造化の度合いも必要とされるツールの持つ精度や使用スピードも異なる。この2つのシステムを結ぶ線上に、情報の構造がまだ不確定な上流工程から、構造が明確化し、その細部を詰めるべき下流工程とを結ぶ、シームレスなデザイン支援環境のあるべき姿がみえてくる。

### ■透明なインタフェース

物理世界におけるモノとのインタラクションと、コンピュータ内にある情報とのデジタル・インタラクションとを、シームレスに融合することに、そしてイ

ンタフェースを認知的に「透明」にすることに、TUIの目標がある<sup>8)</sup>。最期に紹介する、ボトルは、「透明な」インタフェースを目指し、ガラスボトルの持つメタファ的な意味に加え、情緒的・審美的な価値にも注目し、ミニマル・デザインを意図的に追求した作品である。

#### • bottles

人類が数千年にわたって使ってきたガラスボトル。そのメタファとアフォーダンスを、デジタル世界にシームレスに拡張することにより、bottlesプロジェクトはインタフェースの透明性 (transparency) を追求する。ガラスボトルをデジタル情報のコンテナおよびコントローラとして使い、蓋の開け閉めで内容へのアクセスを可能にするシンプルなインタフェースが、その基本コンセプトである。コンセプト検証のため、音楽、天気予報、詩、物語など、多様なコンテンツをデザインした。

筆者が、母親への贈り物として暖めていた「天気予報の小瓶」のアイデアが、このプロジェクトの原点である。台所で醤油の瓶の蓋を開けると醤油の香が漂ってくる—この彼女の良く慣れしたしんだ世界のモデルを、天気予報のアクセスに応用し、小瓶の蓋を開けて小鳥のさえずりが聞こえれば明日は晴れ、雨の音が聞こえてくれば雨天—がその基本的なアイデアであった。このアイデアを発展させ、1998年末に、石井とRich Fletcherが、「音楽の小瓶」(musicBottles)のアイデアを固め、プロジェクトを開始。Joe Paradisoの開発したセンサ技術を用い、カスタム・デザインのテーブル、タグを付けたボトル、クラシック、ジャズ、テクノなど

の音楽コンテンツを多くのデザイナー、アーティストの協力を得て作成、SIGGRAPH 99 Emerging Technologyにおいて発表し、IDEA 2000において、インダストリアル・デザインの賞を受賞した<sup>4)</sup>。

本システムでは、テーブルの下に取り付けたアンテナコイルが、机の上に電磁界を作り出し、タグを付けたボトルの存在と開け閉めにより起きる電磁界の変化をカスタムメイドの電子回路で検出し、それぞれのボトルに対応したプログラム(たとえばピアノを奏でる)を実行するとともに、LEDランプの光をコントロールしている。アンテナコイル内に存在する複数のタグを同時に、リアルタイムに検出できるのが特徴である。

人々の日常生活に溶け込む「透明なインタフェース」が、このプロジェクトのテーマである。日常生活の中に偏在しているガラス瓶に、デジタル・コンテンツ詰めることで、ミニマルな情報アクセス・インタフェースを実現した。

その可能性は、音楽にとどまらない。たとえば、詩の入った香水の瓶、物語の入ったワインボトルなどが考えられる。実用性を追求するなら、薬瓶のいっぱい入った棚。薬の服用のパターンをみて、患者に服用をうながす、その情報を病院へ伝えるなど、多様なサービスが考えられる。私たちの生活の奥深くに浸透しているが故に、ガラス瓶のインタフェースには多様な用途が広がっている。

デザインされたテーブルの上のボトル、それを開けるときのガラスの感触、流れ出る音楽に同期してボトルの中で乱反射するLEDランプからの光、それらは、独特の情緒的な体験を作り上げる。単純なスイッチや、マウスクリックからは決して得ることのできない、情緒的な喜び、想像する喜びを提供する。従来の機能・性能中心のインタフェース・デザインとは異なる美的価値の創造がこのプロジェクトの狙いである。

## おわりに

TUI研究のユニークな点の1つは、従来のデジタルの世界に閉じたインタラクション・デザインとは異なり、物理的なデザインを扱うインダストリアル・デザインとコンピューテーショナル・インタラクション・デザインとの融合した新しい「デザイン・アプローチ」が要求されることにある。

インタラクション・デザインが、デジタルの世界に閉じている限り、それはマウス、キーボード、スク

リーンを前提としたGUIデザインと、それを入れる「箱」のデザインがメインの課題となる。しかし、TUIの視点からみたインタラクション・デザインは、インダストリアル・デザイン、インテリア・デザイン、建築デザインまで包括した広いスペクトラムが要求される。

さらに、bottlesの例にみられるように、情緒的・審美的側面も、必然的にデザインの射程に入ってくるため、TUIデザインは、インタラクティブ・アートとの境界線をもあいまいにする。

今巷で流行している「モーバイル」で「ワイアレス」で「ユビキタス」な機械の次にくる新しいユーザ・インタフェースのパラダイムを探る鍵は、建築とアートにあると筆者は思う。タンジブル・ビットは、それに向けた我々の実験である。

**謝辞** 本稿で紹介した研究プロジェクトと一緒に遂行したタンジブル・メディア・グループおよびMITメディア・ラボの多くの学生・卒業生・同僚達に深く感謝します。また、本研究を支援して下さったMedia Lab TTT (Things That Think) およびDL (Digital Life) consortia sponsorsの皆様に深く感謝します。また忍耐強くこの原稿を待って下さったゲスト・エディタの暦本様に感謝します。

## 参考文献

- 1) Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication, in Proceedings of CSCW '98, (Seattle, Washington USA, Nov. 1998), ACM Press, pp.169-178.
- 2) Fitzmaurice, G., Ishii, H. and Buxton, W.: Bricks, in Proceedings on Human Factors in Computing Systems, (Denver, May 1995), pp.442-449.
- 3) Frei, P., Su, V., Mikhak, B. and Ishii, H.: Curlybot: Designing a New Class of Computational Toys, in Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '00), (The Hague, The Netherlands, Apr. 1-6, 2000), ACM Press, pp.129-136.
- 4) Ishii, H., Mazalek, A. and Lee, J.: Bottles as a Minimal Interface to Access Digital Information (short paper), in Extended Abstracts of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '01), (Seattle, Washington, USA, Mar. 31-Apr. 5 2001), ACM Press, pp.187-188.
- 5) Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, in Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97), (Atlanta, March 1997), ACM Press, pp.234-241.
- 6) Piper, B., Ratti, C. and Ishii, H.: Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis, in Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02), (Minneapolis, April 2002), ACM Press.
- 7) Underkoffler, J. and Ishii, H.: Urp: A Luminous-Tangible Workbench for Urban Planning and Design, in Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '99), (Pittsburgh, Pennsylvania USA, May 15-20, 1999), ACM Press, pp.386-393.
- 8) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, Scientific American, 1991, 265 (3), pp.94-104.

(平成14年1月17日受付)