

AR-Jig: 3 次元デジタルモデリングのための ハンドヘルドタンジブルユーザインタフェース

穴吹 まほろ^{*1} 石井 裕^{*2}

AR-Jig: A Handheld Tangible User Interface for 3D Digital Modeling

Mahoro Anabuki^{*1} and Hiroshi Ishii^{*2}

Abstract --- We introduce AR-Jig, a new handheld tangible user interface for 3D digital modeling in Augmented Reality space. AR-Jig has a pin array that displays a 2D physical curve coincident with a contour of a digitally-displayed 3D form. It supports physical interaction with a portion of a 3D digital representation, allowing 3D forms to be directly touched and modified. This project leaves the majority of the data in the digital domain but gives physicality to any portion of the larger digital dataset via a handheld tool. Through informal evaluations, we demonstrate AR-Jig would be useful for a design domain where manual modeling skills are critical.

Keywords: actuated interface, augmented reality, handheld tool, pin array display

1 はじめに

車やデジタルカメラといったもののデザイン、いわゆるインダストリアルデザインの作業では、3 次元デジタルデータを使ってデザインアイデアを可視化し、操作し、そして検証することが一般的に行われている。そこで使われているユーザインタフェースの一つに、SensAble 社の PHANTOM [1]に代表される 3 次元力覚入出力デバイスを使うものがある。例えばデザイナーは、3 次元力覚入出力デバイスに付けられたペンを介して仮想的な反力や粘性を感じながら、デジタルモデルをインタラクティブに変形することができる。ただしそうしたデバイスで再現されるのは一時にたった1点に対する力覚であり、実際の彫刻等でデザイナーが感じる手全体に対する力覚といったものは実現されない。つまりデジタルデータに対して彫刻やクレイモデリングのような物理的デザイン手法で培ったスキルを活かすことはできなかった。

そこで本論文では、3 次元デジタルデータに対する、一時に 1 点以上の力覚表現を用いた物理的なインタラクションの実現を目指す。それにより、デジタルデータを使ったデザインワークにおいても、長い歴史で育まれた物理的なデザイン手法のスキルを利用可能としたい。さらには、3 次元デジタルモデリングの初心者に対しても、手全体を使ってモデルを変形させるといった、直感的なデジタルモデリング方法を提供したいと考える。

そうしたインタラクションを実現するために、我々はデ

ジタルデータに物理的実体を与えることでその直接操作を可能とするタンジブルユーザインタフェース (Tangible User Interface; TUI) [2]に着目する。ただし、全てのデータに物理的実体を与えようとするのではなく、一部のデータにのみ与えるものとする。その限定的な物理的実体は、ハンドヘルドツールを使って 3 次元デジタルデータの任意の部分に適用できるようにし、残るデジタルデータはそのままデジタルの領域に残す。

具体的には、物理的実体を与える部分として 3 次元デジタル形状上の曲線を取り上げ、Augmented Reality (AR) 技術を用いてその物理的な曲線と残るデジタルデータとの空間的な関係を可視化する。この試みを実現すべく、我々は図 1 に示す AR-Jig と名づけた TUI を考案した。AR-Jig はハンドヘルドなピンアレイを持ち、そのピンアレイの形状で AR 空間中に表示される 3 次元デジタル形状の輪郭に相当する 2 次元曲線を物理的に表現する。

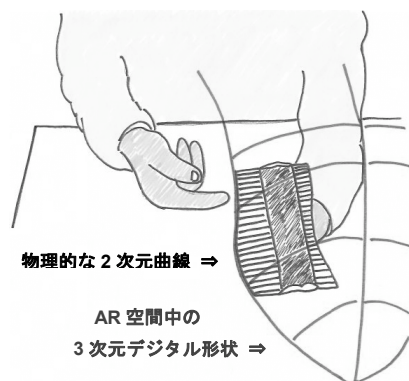


図1 AR-Jig のコンセプト

Fig.1 AR-Jig concept

^{*1} キヤノン株式会社, 映像情報処理技術開発センター

^{*2} MIT メディアラボ, タンジブル・メディア・グループ

^{*1} Canon Inc., Visual Information Technology Development Center

^{*2} MIT Media Laboratory, Tangible Media Group

図2に示すのは、そのAR-Jigのプロトタイプシステムで、12本の一行に並んだピンを備えている。各ピンは、センサによって位置が計測され、手によって前後移動可能で、さらにモーターによっても駆動される。そして12本のピン全体で、Head Mounted Display (HMD) 越しに見える3次元デジタル形状の輪郭の一部を物理的に表現する。

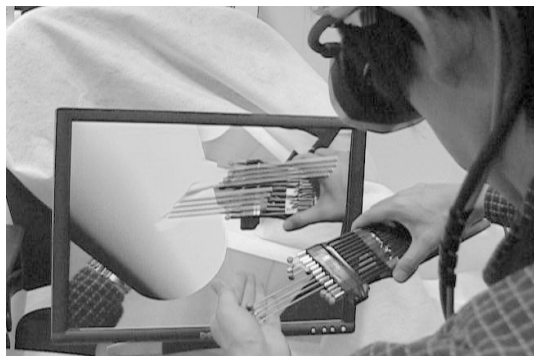


図2 AR-Jigのプロトタイプシステム

Fig.2 The first prototype system of AR-Jig

本論文では、まず関連研究について述べた後、AR-Jigのシステムデザイン、プロトタイプシステム、インタラクションテクニックについて説明する。その後、本提案の実応用への可能性を探るために行った定性的な評価を紹介し、最後に今後の課題と結論を述べる。

2 関連研究

2.1 デジタル形状制御ハンドヘルドツール

SensAble社のPHANTOMを使ってAR空間で3次元モデルの移動、回転、変形を行うシステムとして、CSIROのHaptic Workbench [3]が知られている。T'nD [4]と呼ばれる自由形状モデリングシステムでは、別の3次元力覚入出力デバイス2つにボールジョイントで接続された定規を使って、反力を感じながら仮想物体の表面を削ることができる。力覚提示部を持たないハンドヘルドツールも、3次元デジタル形状制御に用いられている。例えばSpacedesign [5]は、空間中にペンを使って自由な形状の輪郭や表面を描くためのシステムである。Surface Drawing [6]は、手に持ったツールや手自体でのジェスチャによって、有機的な3次元形状を作成するシステムである。この直接的なインタフェースは、アーティスティックな3次元デジタル表現に適したツールとして知られている。GeOrb [7]は3次元的な動きを制御するための球体型ツールで、球体表面を圧迫するとデジタル形状の対応する面を変形させることができる。以上に紹介したツールはいずれも、デジタル形状との間接的な仮想接触を実現する点で、直接接触をサポートするAR-Jigと異なっている。

2.2 デジタル形状制御タンジブルユーザインタフェース

デジタル形状制御のためのTUIとしては、古くから知られるアナログのデザインツールを参考にして実現されたものが知られている。例えばDigital Tape Drawing [8]は、テープドローイングに倣ってデザインされた3次元デジタルドローイングツールである。Illuminating Clay [9]は、クレイモデリングに基づいてデザインされている3次元(2.5次元)デジタルモデリングインタフェースである。アナログツールを模する以外のアプローチとしては、Andersonらのブロック[10]やActiveCue [11]など、機器が埋め込まれた組み立てブロックを使うことが提案されている。Tangible Augmented Reality Modeling (TARM) [12]もそれに類する提案で、物理的なブロックをAR空間に置いていくと、仮想的にその場にコピーが生成され、ブロックを置きなおしていくことで仮想モデルを組み上げていくことができる。ShapeTape [13]はテープ状のTUIで、テープの曲がりやねじれを計測し、そのテープ形状をデジタルな曲線や曲面に適用することでデジタル形状のマニュアル制御を可能にしている。

上記のTUIは、どれも物理的なメディアの使いやすさを保ちながらデジタルメディアを扱えるという点で、デザインや教育の分野で高く評価されている。しかしながら、どれもデジタル形状の「生成」に特化している。それらに対しAR-Jigは、すでに存在するデジタル形状の輪郭にその場で物理的形状を与えることで、デジタル形状の「修正」も可能にする点で異なっている。

物理的表現を駆動によって変化させるTUI自体は、すでに提案されている。例えばActuated Workbench [14]、Planar Manipulator Display [15]、Proactive Desk [16]は、テーブル上の物理的な点物体を磁力もしくはモーターで動かすことで、デジタルデータをユーザにも操作可能な形状で表現する。これらに対しては、AR-Jigは点物体ではなく曲線を駆動させる点、および、テーブルに拘束されることなく、手が届く範囲の3次元空間中にある任意の曲線を駆動できる点で異なっている。また、能動型環境ディスプレイで形状表現デバイスの位置姿勢を制御して、仮想物体からの力覚フィードバックを実現する方法も知られている[17]。AR-Jigもこれに類するが、形状表現デバイスの位置姿勢をユーザが制御することによって、よりシンプルな実現を目指している。

2.3 ピンアレイディスプレイ

AR-Jigは駆動する一列のピンアレイで2次元のデジタル曲線を表現する。このアイデアは、輪郭ゲージ(伝統的な輪郭計測ツール)や子供のおもちゃであるピンアート、さらには以下に紹介するピンマトリックスディスプレイから着想した。FEELEX [18]やWangerらのディスプレイ[19]は、初期の典型的なピンマトリックスディスプレイで、RCサーボモーターによってピンを駆動する。

Nakatani らのディスプレイ[20]は、コイル状の形状記憶合金を使ってピンを駆動している。Haga らの点字ディスプレイ[21]も、形状記憶合金を使ってピンを駆動する。Nothrop Grumman の TerrainTable [22]は、駆動可能なピンで表面を埋め尽くした大き目のテーブルで、地形表示用として販売されている。Lumen [23]は、ピン自体の色を制御することで視覚的な情報を表示するとともに、ピンの駆動によってダイナミックな物理形状も同時に表現するピンマトリクスディスプレイである。

ピンマトリクスディスプレイに比べると、AR-Jig はより少ないピンと駆動部で実現されるので、より簡単に実装でき、かつ手に持てる程度に軽くすることができる。この軽さにより手持ちツール化が可能となつて、3次元デジタル形状の要素を表現することができる。この点でAR-Jig は、テーブルトップ型で2.5次元デジタル形状を表現するピンマトリクスディスプレイと異なっている。

3 システムデザイン

多くのデジタルデザイン表現は、主にコンピュータモニターに表示され、マウス等を介して間接的に操作されている。そうしたデジタルデザイン表現に対し、物理的な実体を与えることで現実の3次元空間でのデザイン操作を可能にすることを旨としたTUIが、これまでに数多く提案されている。

ただし、対象となるデジタルデザイン表現が、例えば車のようにスケールの大きい3次元形状の場合、それに物理的な実体を与えることは現実的には難しく、コストも高くなる。また、その表現がダイナミックに変化する場合には、それに物理的な実体を与えるのはさらに難しい。

そこで、3次元形状を対象にしたデジタルデザインで多く用いられているのが、PHANTOM [1]に代表される1点を表現するハプティックディスプレイである。例えばPHANTOMは、ユーザが手に持つツールに対して機械的にフォースフィードバックを発生する。ユーザはそのツールを動かすことで、ツール先端の1点を通じて3次元デジタル形状を力覚的に感じる事ができる。しかし、ただ1点のみに物理的な実体を与えるだけでは、デジタル表現が物理的な実体を持つことによるメリットを十分に得られるとは言えない。

以上を踏まえ、我々は、3次元デジタル表現の、せめて1点以上で構成される「一部」に、汎用的な物理的な実体を与えることを考えた。そしてその物理的な実体を任意の三次元物体の一部に適用できるように、ハンドヘルドタイプとして物理的な実体を表現するAR-Jigと呼ぶTUISystemをデザインした。

多くの3次元モデリングソフトウェアが3次元物体の輪郭曲線を使って形状を制御する機能を備えていることに着目し、最初に取り組む汎用的な物理的な実体として2次元曲線を選択した。2次元マトリクスを物理的な実体と

して利用することも検討したが、マトリクスの内側部分を直接的に操作すること(手で内側領域を引っ張ること)が難しいと考え、今回は選択しなかった。物理的な実体としての2次元曲線は、実装が難しいと思われた1本の駆動する曲線ではなく、束になってそれぞれが前後に駆動する複数直線の端点で表現することとした。

我々のアプローチは、TUIの1つのメリットである「複数人による同時多発的なデータ操作」は実現しえないが、TUIが持つ以下の3つのメリットを実現する。

1. データの直接操作
2. データの物理的な実体に基づく、指、手のひら、さらには身の回りの物を使ったアドホックなデータ操作
3. コンピュータによる物理的な実体の駆動

タンジブルなインタラクションがもたらすこれらのメリットは、これまでのデジタルデザインツールではなしえなかった方法によるデジタルデータの修正を可能にする。

4 プロトタイプシステム

本節では、AR-Jigの価値検証のために実装したプロトタイプシステムについて述べる。

4.1 ハードウェア

ハードウェアは、図3に示すように6自由度位置姿勢センサ・ピンコントローラ・ジグ(一列に並んだピン)・ワンド・HMD・PCの6つの部分を備えている。

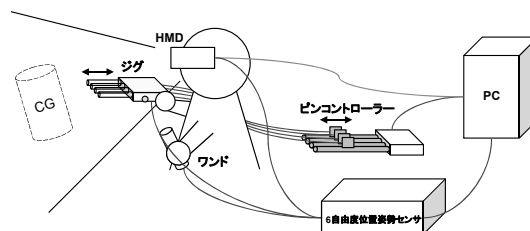


図3 ハードウェア構成

Fig.3 Hardware architecture

6自由度位置姿勢センサ(POLHEMUS社製Fastrak)は、ジグ・ワンド・HMDのトラッキングに用いた。ジグを構成するピンを前後に動かすピンコントローラは12個のモーター駆動スライドポテンシオメーター(駆動幅100mmのアルプス電気社製RSA0N11M9A05)で構成した。スライダの駆動応答速度は0.04秒程度、移動速度は0.42m/s、駆動トルクは約5Nである(すべて実測値)。ワンドには自作のプラスチック製ハンドルを用いた。HMDとしてはビデオシースルー方式HMDであるキヤノン社製VH-2002を利用した。PCにはLinux OS, Intel Pentium 4 Processor 3.60GHz, および nVidia Quadro FX 3400を搭載した。

12個のモーター駆動ポテンシオメーターは合わせて612gの重量となり、手に持って操作するには重い。そこでジグを構成するピンに、自転車のブレーキワイヤー

(細い金属ワイヤーで、先端に直径 7 mm, 高さ 10 mm の円柱部を持つ)を利用し、その長さを 1.78m と長くすることで、図 4 に示すようにジグとピンコントローラーを分離した。その結果、手に持つ部分の重量は約 200g となった。操作範囲は限定されるが、ジグを手にとって 3 次元物体の一部を直接的に選択することが可能となった。操作範囲の限定は明らかなデメリットではあるが、それを認識した上で、今回は実装の容易さを優先し、このスタイルを選択した。



図4 ジグ(左手前)とピンコントローラー(右奥)

Fig.4 Jig (left front) and pin controller (right back)

4.2 ソフトウェア

プロトタイプシステムのソフトウェアは、図 5 に示すように、ヘッドトラッカー・AR ベースシステム・ジグトラッカー・ワンドトラッカー・ピントラッカー・ピンアクチュエーター・フォームコントローラーの 7 つの部分で構成されている。これらはすべて、AR ソフトウェア開発キットである MR プラットフォーム SDK [24]を利用して実装した。

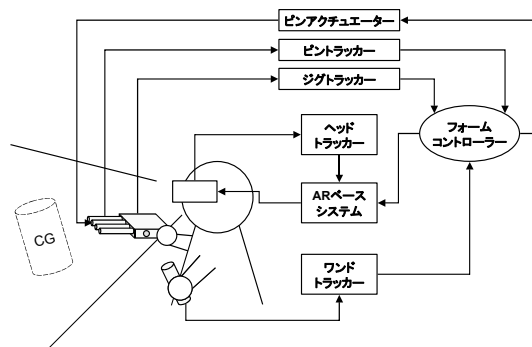


図5 ソフトウェア構成

Fig.5 Software Architecture

フォームコントローラーは、ピントラッカーから受け取るジグのピンの位置に基づいて、CG モデルの形状を変更する。CG モデルは IV ファイルフォーマットのポリゴンデータである。5.1.3 節で説明する形状最適化機能が選択されている場合には、フォームコントローラーはジグのピン位置に基づく CG モデル形状の変更につき、事前設定された定量的制約に基づく形状の再変更を行う。

5 インタラクションテクニック

前節で述べた AR-Jig のプロトタイプシステムは、TUI の 3 つのメリットを活かした 3 つのタンジブルインタラクションをユーザに提供する。また、デジタルモデリングにおける一般的な機能として、いくつかのインタンジブル(非タンジブル)インタラクションも提供する。

5.1 タンジブルインタラクション

5.1.1 マニュアル形状変形

TUI のメリットである「直接操作」に基づくマニュアル形状変形は、手に持ったジグで AR 空間中に表示されるデジタル物体の表面上の曲線を選択することから始まる。ジグからデジタル物体表面までの距離が十分近い場合(数回の試行を経て適当と思われた距離である 12 cm 以下)にジグのボタンを押すと、ジグの各ピンに最も近いデジタル物体表面上の点が探索され、AR 空間上に立方体で示される(図 6(a))。その状態でボタンから指を離すと、探索されていた各ピンまでの最近点を含むデジタル曲線が選択される。今回のプロトタイプでは、折れ線を使ってデジタル曲線を表現した。しかし、より細かな形状変形のためには、NURBS 曲線のようなより高度な数学的曲線を使うことが望まれる。



(a) 仮想曲線の選択 (A digital curve is selected)



(b) 物理的の曲線化 (The selected curve becomes physical)



(c) 手による曲線操作 (Hand modification of the curve)

図6 マニュアル形状変形

Fig.6 Hand modification of digital form

曲線選択後、選択したデジタル曲線と同じ形状をもつ物理的な曲線を表現すべく、システムがジグのピンを駆動する。そしてデジタル物体がジグのピンに向かって移動し、選択したデジタル曲線と、ピンで表現された物理的な曲線が重なり合う(図 6(b))。その後、ユーザがジグのピンを操作して物理的な曲線を変形すると、選択したデジタル曲線も同じように変形して物理的な曲線との重なりを保つ(図 6(c))。その際、デジタル形状の変形が滑らかになるように、選択したデジタル曲線の周囲表面も変形する。デジタル曲線が選択されている状態で、再度ジグのボタンが押されると、デジタル曲線の選択が解除され、別の曲線の選択が可能となる。

5.1.2 フィジカルコピー&デジタルペースト

コピー&ペーストは、デジタルデータに対する操作として基本的なものである。TUI のメリットである「データの物理的実体」を活かしたテクニックは、この基本操作に似たフィジカルコピー&デジタルペースト(Physical Copy and Digital Paste)と呼ぶものである。このテクニックでは、現実物体の輪郭を物理的にコピーし、デジタル物体表面上にその輪郭を貼り付ける(図 7)。

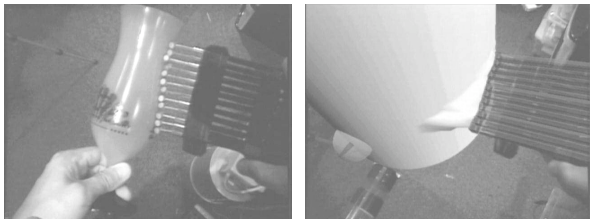


図7 フィジカルコピー(左)&デジタルペースト(右)

Fig.7 Physical Copy (left) and Digital Paste (right)

現実物体にしかるべき輪郭を見つけた場合、ユーザはジグのピンを物体に直接押し当てることで、その輪郭をピンの形状としてコピーすることができる。続いてそのピン形状を保ったまま、AR 空間中に表示されたデジタル形状の表面にそのピンを押し当てると、同じピン形状、すなわちコピーした輪郭が、デジタル形状表面に貼り付けられる。そのままデジタル形状を回転させれば、ろくろを回すようなスタイルで、コピーした輪郭による新たなデジタル表面が張られていく。

このテクニックにより、AR-Jig は身の回りのものを雲形定規(多くの異なるカーブからなるテンプレート定規)のように使うことができる。空き缶の表面は、ピンを押し当てる角度に応じてさまざまな楕円を作り出す。円錐状の物体があれば、双曲線や放物線を作ることができる。立方体がひとつあれば、90 度から 180 度までの任意の角度を作り出すことができる。

5.1.3 タンジブルコラボレーション

プロダクトデザインの過程においては、規則や製造上の要求などに基づく、数値的な制約を守ることが重要となる。しかし、デザイナーがデザインの過程で常にその

制約を意識し続けることは実質的には難しい。もしコンピュータがそうした制約を満たすことを補助できれば、デザイナーはデザイン探索自体により集中できるだろう。AR-Jig は TUI が持つ「コンピュータによる物理的実体の駆動」というメリットを利用して、コンピュータによる数値的な制約を満たす形状への最適化結果をリアルタイムに物理的に表現する。プロトタイプシステムにおいては、ユーザのピン操作によるデジタル形状の修正が数値的な制約を満たさない場合に、形状を制約に合うように最適化し、それに合わせてピンを駆動する。それにより、ユーザは特に意識することなく、ピンからの抗力(約 5 N のピンコントローラーによる反力)を通じて、数値的な制約に基づく変形を力覚的に感じることができる。ユーザはピン抗力の方向などから、形状最適化の背景にある数値的な制約を想像しつつ、自らのデザイン意図と数値的な制約の両方を満たす形状を模索することができる。

プロトタイプシステムにおいては、以下の 3 つの形状最適化機能を実装した。

- ・ 円滑化: ジグのピン周辺の、デジタル形状表面の曲率半径が閾値よりも大きい場合に、曲率半径が小さくなる方向にピンを駆動する
- ・ アクセスコントロール: デジタル物体の表面変位可能領域が設定されている場合、その領域外にジグのピン(すなわちデジタル物体表面上の点)が進出した場合に、ピンを領域内の押し戻す
- ・ 数値的調整: ユーザによるピンの移動量(すなわち形状変化量)が常に数値的に切の良い大きさになるようにピンの移動量を毎回微調整する

円滑化およびアクセスコントロールは、条件を満たすたびに直ちに実行される。数値的調整はユーザによる操作の度に実行される。ゆえに、ユーザが作成した形状が最適化によって著しく変化することはない。

5.2 インタンジブルインタラクション

AR-Jig は、デザインタスクをデジタル側から支援するインタンジブルなインタラクションも提供する。

5.2.1 デジタル形状の移動および回転

ジグとは別に用意されているワンドでデジタル形状に触れると、ワンドにデジタル形状が接着し、ワンドを使って形状の移動および回転ができる。その状態でワンドを閾値以上の速さで(数回の試行を経て適当と思われた 3 m/s 以上の速さで)振ると、ワンドからデジタル形状が離れる。デジタル形状は、ワンドが閾値以上の速度になる直前の位置に配置される。

5.2.2 デジタル形状の変形

ジグのハンドルにあるボタンを押さない状態で、ジグのピンがデジタル形状の表面に触れると、接触点がピン先端の位置へと移動し、接触領域が陥没する(図 8)。ピン先端がデジタル形状の内部にあり、ピンの側面がデ

デジタル形状の表面に触れた場合にも、その接触点はピン先端の位置へと移動して、接触領域は陥没する。

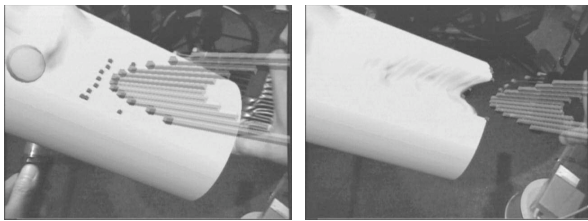


図8 ピンによるデジタル形状の陥没(左から右へ)

Fig.8 Cave in a form (left to right)

デジタル形状表面にある曲線が選択されていない状態で、ジグのハンドルにあるボタンを押したまま、ジグのピンが一本でもデジタル形状の表面に触れると、全ピンに対して最も近傍にあるデジタル形状表面上の点がピンの先端位置へと移動し、結果としてデジタル形状表面が隆起する(図9)。

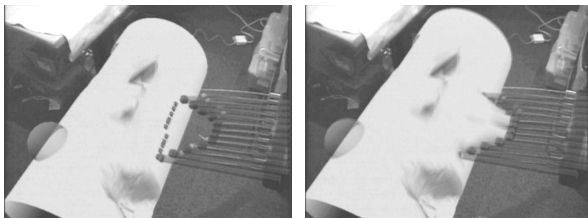


図9 ピンによるデジタル形状の隆起(左から右へ)

Fig.9 Heap up a form (left to right)

上記二つのインタラクションは、PHANTOM のような良く知られたデジタルデザインツールを使うときのインタラクションに似ている。つまり、既存のデジタルツールに慣れたユーザがすでに持つデジタルデザインスキルを AR-Jig に対しても適用できることが期待できる。

デジタル形状を陥没させたり隆起させたりするためのジグのピン形状は、コンピュータによって制御可能である。プロトタイプシステムの場合、ジグがデジタル形状表面から十分離れている(12 cm 以上)時にジグのハンドルにあるボタンを押すと、ピンは事前に設定された10種のテンプレート形状(角, 円弧, V 字, U 字, 平坦, 右上がり直線, 左上がり直線, 一本歯, 二本歯, 三本歯)を順に表現するように駆動する。

5.2.3 スケーリング

デジタル形状表面上の曲線が選択されている状態(マニュアル形状変形が可能な状態)で、ジグのハンドルのボタンを押し、かつワンドでデジタル形状に触れると、そのデジタル形状は、ジグのピンとワンドの両方に接着する。ジグのハンドルのボタンを押し続けている間はその接着状態が保たれるように、デジタル形状はその位置とスケールを変化させる、すなわち、ジグのピンとワンドの距離を変えると、デジタル形状のスケールが変化する(図10)。もしユーザがデジタル形状のある部分にズ

ームインしたい場合には、まずはスケーリングテクニックを使ってデジタル形状全体を大きくした後に、ワンドを使ってデジタル形状を移動回転し、最後に対象部分を注視することによってズームインがなされる。

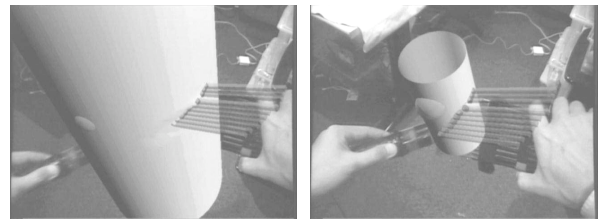


図10 デジタル形状のスケールダウン(左から右へ)

Fig.10 Scale down a model (left to right)

5.2.4 操作の繰り返し、取り消し、全取り消し

AR-Jig は、デジタル形状変形操作の繰り返し(Redo)、取り消し(Undo)、および全取り消し(Reset)もサポートしている。それらは、ワンドがデジタル形状に触れていない状態で、閾値以上(ワンドからのデジタル形状の取り外し時と同様に 3 m/s 以上)の速さで振ることによって実行される。ワンドを上から下に向かって振り下げると、その直前の操作が繰り返され、逆にワンドを下から上に向かって振り上げると、その直前の操作が取り消される。ワンドを左右に振ると、全ての操作が取り消される。

5.3 インタラクション選択方法

AR-Jig はいくつかのインタラクションを提供するため、ユーザが利用するインタラクションを選択する手段が必要である。AR アプリケーションにおけるそうした選択手段としては、ペン型のデバイスでプレート型デバイス上に表示されるメニューを選ぶものがある(例えば[5])。しかし我々のプロトタイプシステムでは二つのハンドヘルドデバイス(ジグとワンド)を利用するため、この手段を選択しなかった。メニューを AR 空間中のどこかに表示し続けることも考えられるが、AR 空間の自由な利用を阻害することから、採用しなかった。

プロトタイプシステムにおいては、ジグのハンドルのボタン、ジグとデジタル形状間の距離、およびワンドとデジタル形状間の距離を利用して、インタラクションを選択する手段を用意した。ジグとデジタル形状間の距離が閾値(数回の試行を経て適当と思われた 12cm)以下かつ 0cm 以上のときにジグのハンドルのボタンが押されると、マニュアル形状変形が選択される。もしその距離が 0cm であれば、デジタル形状の陥没が可能となる。さらにジグのハンドルのボタンが押されていれば、デジタル形状の隆起が選択される。マニュアル形状変形が選択されている状態で、ワンドとデジタル形状表面の距離が 0cm になり、かつ、ジグのハンドルのボタンが押されると、スケーリングが選択される。

どのインタラクションが選択されているのかをユーザ

に示すために、プロトタイプシステムでは仮想のジグを実物のジグの上に重ねて表示し、その仮想ジグの色を使って選択されているインタラクションを示した。例えば、どのインタラクションも選択されていない場合には緑の仮想ジグが表示され、マニュアル形状変形が選択されると仮想ジグの色が黄色に変化する。

6 評価

AR-Jig における「ハンドヘルドピンアレイディスプレイを利用して3次元デジタル形状の一部に物理的実体を与える」というコンセプトには、3次元デザインに大きな進歩をもたらす可能性があると考えられている。そこで、プロトタイプシステムは開発初期段階ではあったが、それを用いた定性的な二つの評価実験を行い、AR-Jigが持つ可能性の検証と実用化に向けた改良点の洗い出しを行った。

6.1 評価 1: エンドユーザーによる評価

6.1.1 評価手順

11人の被験者に、AR-Jigを使って円筒モデルから自由な形状をモデリングしてもらった。1人のCAD熟練者を除く10人の被験者は、3次元デジタルデザインツールの利用経験の浅い初心者であった。

まず被験者は、実験者からの5分間のデモンストレーションを通じてプロトタイプシステムの使い方を学び、続く5分間で、実際にシステムを使いながらモデリングの練習を行った。その間、被験者は実験者に対して自由に質問を行った。続いて再び実験者が、5分間でプロトタイプシステムに備わる形状最適化機能についての説明を行った。その後、形状最適化機能が有効な状態で、被験者は再び5分間の練習を行った。計20分の学習および練習を終えると、実験者の観察の元で、被験者は15分以内に自由な形状をモデリングする作業を2回行った。その際、2回目のみ形状最適化機能を有効とした。図11に、被験者のモデリング結果例を示す。



図11 被験者のモデリング結果例(左:顔, 右:兎)

Fig.11 Examples of modeling results by the subjects

モデリング作業を終えると、被験者はアンケートに回答した。アンケートでは、AR-Jigの使いやすさ、モデリング速度、変形制御、最適化機能、操作の可逆性、物体の拡大縮小について訊ねた。その後、実験者は被験者に評価作業全体に関してインタビューを行った。

6.1.2 アンケート結果

<使いやすさについて>

9人の被験者がAR-Jigは使いやすく直感的であったと回答した。3人の被験者は、慣れるのにより時間が必要であると指摘した。その理由として、AR-Jigを使ったモデリングスタイルがクレイモデリングのような既存のものとは大きく違う点が挙げられた。

<モデリング速度について>

7人の被験者がモデリング速度に関して好意的に評価した。3人の被験者は、ジグのピンをデジタル形状に押し当てて変形させる方法に比べ、ピンを手で動かしながら変形させる方法の遅さに不満を述べた。

<変形制御について>

7人の被験者はAR-Jigによるデジタル形状の変形制御に満足したが、残る4人は不満を述べた。この4人の被験者は、彼らのデザインアイデアを表現するための、より高度な数学的表現の必要性を指摘した。

<最適化機能について>

8人の被験者が形状最適化に基づく力覚的なフィードバックの価値を理解した。CAD熟練者であった被験者は「ピンの抗力はモデリング意図に反していたが、タスクと制約が合っていれば役立つだろう」と指摘した。

<操作の可逆性について>

全ての被験者が操作の可逆性(操作の繰り返し、取り消し、全取り消し)について好意的な評価を下した。全ての被験者が何の問題もなくこの機能を使いこなしていたことも、評価実験中に観察された。

<物体の拡大縮小(スケーラビリティ)について>

物体の拡大縮小に関しては、どの被験者も少なからず困難を感じているようであった。それにもかかわらず、7人の被験者は、物体の拡大縮小機能の有用さを指摘した。特に4人の被験者は「大きさを自分のイメージに合わせるため」や「細部の変形を行うため」に、モデルのスケールを大きくしていた。観察された操作の困難さは、被験者のコメントによれば、拡大縮小機能の使い勝手によるのではなく、この機能呼び出す手順の難しさに起因しているようであった。

6.1.3 インタビューおよび観察結果

<物理的実体>

ピンによるデータの物理的実体は活用されており、5人の被験者が「ピンによる実体化でデジタルな表面が理解しやすく、形を変えやすく、かつ、モデリングの手順が想像しやすい」といった好意的なコメントを残した。4人の被験者は、自身の体や身の回りの物を使ってピン形状を変えていた(フィジカルコピー&デジタルペースト)。ある被験者は、ピンを動かさない限りその形状が保たれることを利用して、手でデジタルな曲線を変形した後に、そのピン形状をそのままにして他の表面にその曲線を貼り付けていた。また別の被験者は、デジタルな曲

線を選択した後、手でピン形状修正を行わずにその曲線を他の表面に貼り付けていた。

＜モデリングスタイル＞

3次元モデリングツールもしくはARシステムの利用経験が比較的多かった5人の被験者は、戦略的にテクニックを使い分けていた。例えば、はじめにピンを直接デジタル形状に押し当てて陥没させたり隆起させたりしながらラフに形状を作り、その後にマニュアル形状変形を使って丁寧に形状を整えていた。対照的に、3次元モデリングツールおよびARシステムの利用経験が比較적少なかった6人の被験者は、ひとつのテクニックを使い続ける傾向が見られた。それら6人にとっては、AR-Jigは多機能すぎだったように思われた。

＜他のデジタルツールとの比較＞

5人の被験者が、AR-Jigで行ったモデリングを他のデジタルツールでもできるとは思えないと述べた。CAD熟練者であった被験者は、「同様のモデリングを従来のツールで行うのは不可能だ。これまでは数学的な機能を使って曲線を作り、それが意に沿わなくても修正することをあきらめていたが、AR-Jigであればあきらめずに修正し続けられそうだ」と述べている。

＜楽しさ＞

全ての被験者がAR-Jigによるモデリングを楽しんでいた。9人の被験者がAR-Jigによるモデリングを粘土遊びや彫刻に喩えた。ある被験者は「AR-Jigはアートツールにもなる」と述べ、別の被験者は子供向けのデジタルモデリングツールになる可能性を指摘した。

＜ジグ形状＞

5人の被験者が、ピンが一行に並んでいるジグの形状について否定的なコメントを残した。例えば、「ピンによる表現では粗すぎで不正確」「解像度が低すぎる」「幅が狭すぎる」「各ピンは指サイズぐらいがいい」「ピン一列ではアイデアを表現するのに不十分」「ピンの列を曲げたりひねったりしたい」「ピンマトリックスはどうか」などのコメントが寄せられた。

＜ジェスチャ＞

デジタル形状の移動、回転、変形に関しては、各被験者とも問題なく活用していた。しかし、スケーリング、操作繰り返し、操作取り消し、操作全取り消しのためのジェスチャは、時々被験者を混乱させていた。例えば、数人の被験者が操作繰り返しのジェスチャを操作取り消しや操作全取り消しのジェスチャと間違えたり、デジタル形状をジグのピンから離す行為が意図せずスケーリング用のジェスチャになっていたりしていた。

＜インタラクション選択＞

全被験者が、多かれ少なかれ、インタラクションの選択に苦労していた。ある被験者は、仮想のジグの色で実行可能なインタラクションを示すことの有効性を指摘しつつも、色とインタラクションの対応を覚えきれないこと

を指摘した。別の被験者は、インタラクション選択用にボタンやスライダーといった入力デバイスを使ったり、振動・音・仮想アイコンを利用した選択情報のフィードバックを使ったりすることを提案した。

＜疲労＞

現在のプロトタイプシステムは長時間の使用には向いていないことが、評価を通じて観察された。3人の被験者は疲労について不満を述べ、ある女性被験者からはジグのハンドルが大きくて重いと指摘された。

6.1.4 長所と短所

エンドユーザーによる評価を通じ、AR-Jigは初心者でも使いこなすツールであることが明らかになったと考える。タンジブルインタラクション(形状最適化時の力覚フィードバックやフィジカルコピー&デジタルペースト)は好意的に受け止められ、デジタルの良さである操作の可逆性やデータのスクーラビリティも活用されていた。AR-Jigは、タンジブルなメリットとデジタルなメリットの両方を兼ね備えたツールと言える。また、われわれの予想を超えて、AR-Jigによるモデリングは被験者を大いに楽しませていた。AR-Jigは、過去の多くのTUIと同様に、デジタルトイやアートツールになる可能性があるように思われる。

一方、ネガティブな要素としては、定量的なデータ表現力の不十分さとインタラクション選択操作の難しさが挙げられる。前者はTUIが共通して持つ短所であり、後者はデジタルインタフェースが持つ多機能性に起因するといえる。今回の評価は、AR-Jigがタンジブルおよびデジタルのメリットだけでなく、双方のデメリットも合わせて持っていることを示していると考えられる。また、一部の被験者が指摘するように、ピン一列を使った表現では、本質的なモデリング要求に応えられないケースがある。ピン一列でも役立つ場面が少なからずある一方で、物理的形状が利用可能場面の制約となっている点は、従来のデジタルモデリングツールに対する短所といえる。

6.2 評価2: 専門家へのインタビュー

エンドユーザーによる評価を終えた後、我々はカーモデルの形状を変更できる簡単なアプリケーションを作成した(図12)。このアプリケーションを専門のカーデザイナーおよび義足モデラーにデモンストレーションして、インタビューする機会を得た。



図12 AR-Jigによるカーモデル変形アプリケーション

Fig.12 Car Model Modification Application with AR-Jig

6.2.1 カーデザイナーによる評価

カーデザイナーは、多くのデザイナーが複雑な 3 次元形状をより簡単に把握するために断面図を良く使うことを根拠に、3 次元形状修正に曲線を利用することの有用性を指摘した。そして、よりしなやかな形状を表現するために、平面上に拘束された 2 次元曲線だけでなく、3 次元曲線も利用することが提案された。また、実物大でモデルを観察し、その周りを歩きながらモデリングできる点も有用であろうとのことであった。

一方で、形状操作における数値的な精度の悪さは致命的であると指摘された。エンドユーザーも指摘したピンの粗さだけでなく、3 次元空間中でのジグの操作精度についても懸念された。実利用を考えるのであれば、例えば、AR-Jig を空間中で固定したり、ある軸に沿って平行に動かしたりといった要求が考えられるという。そこで、AR-Jig を空中に固定したり、一定方向に平行移動させたりするためのレールを導入することも提案された。

また最後に、例え AR-Jig が数値的にも高精度で、他のどのツールよりも素晴らしい使い勝手を提供できたとしても、これまでに長く使われ続けてきた安価な GUI を押しのけてまで、AR-Jig が利用されるようになるのは難しいかもしれないと指摘された。仮に GUI の性能が多少悪くとも、安さゆえにどこでも何個でも用意できる GUI を選ぶのが、実質的な判断であろうとのことであった。

6.2.2 義足モデラーによる評価

義足モデラーとは、体と義足をつなぐソケットと呼ばれる部分をユーザの体に合わせてモデリングする専門家である。その義足モデラーによれば、現在知られるデジタルモデリングの方法では、人体のような有機的な形状に合わせてモデリングすることは非常に難しい。また、義足を使用していく中で人の体は痩せていくので、その未来の痩せた人体を想定して、ソケットを作り出さなければならないという制約もある。ゆえに現状では、熟練した手を使って物理的にソケットを削りだしていく方法がとられている。しかし形状データのロードやコピーといったデジタルモデリングならではのメリット自体は、この義足モデリングにおいても渴望されている。ゆえに我々がインタビューした義足モデラーは、熟練した手を使える上に、デジタルなメリットも使えるソケットモデリングを実現するであろう AR-Jig を、非常に高く評価した。

6.2.3 考察

カーデザイナーと義足モデラーの評価の違いから、我々は次のように考える。AR-Jig がタンジブルな要素とデジタルな要素の両方をモデリングに提供していても、ツールの性能上支配的なのはタンジブルな要素である。ゆえにカーモデリングのように、デジタルなモデリングがすでに十分に実用化されている場合には、仮にタンジブルな要素が何らかのメリットをもたらすとしても、既存のスタイルを変えるのは難しいと思われる。しかし、義足

モデリングのように、既存のデジタルモデリングでは解決できない課題を抱える領域においては、タンジブルな要素によって初めて達成される課題解決方法を提供することによって、AR-Jig は実用的に使われうるのではないかと考える。

7 今後の課題

ハンドヘルド性は、AR-Jig の重要な特徴である。しかし今回実装したプロトタイプシステムは、真にハンドヘルドであるとは言えない。ピンを駆動する部分の小型化および軽量化を行うことが、今後の重要な課題である。また、カーデザイナーから提案されたように、レールや 3 次元力覚入出力デバイスなどを用いて、AR-Jig を空間中で定量的に操作できる仕組みの検討も必要である。こうした課題解決に加え、より高度な数学的デジタル表現との融合やボタンなどの UI 導入等を含む改良を終えた後には、モデリングの専門家とともに、GUI や 3 次元力覚入出力デバイスを利用する既存のモデリング方法との比較による、AR-Jig の定量的な評価を行いたいと考えている。

8 結論

3 次元デジタルモデリングは、多くのデザイン分野において重要になってきている。これまでに様々なデザインワークに応用されてきた TUI も、大規模で複雑でダイナミックな 3 次元形状のデザインに対しては実質的に無力であった。それに対して AR-Jig は、3 次元形状の大部分を HMD 越しに見ることができる仮想空間に残したまま、一部(今回の場合は 2 次元曲線)のみに物理的実体を与えることで、そうしたデザインに対しても TUI のメリットを提供する。このアプローチは、デジタル形状の持つメリットとタンジブルな変形インタフェースの持つメリットを、まったく新しい形で組み合わせている。その両者を同時に必要とする、義足モデリングのような領域においては、AR-Jig の実用化に価値があると考えられる。

謝辞

本共同研究実現にご尽力いただいたキヤノン(株)小松利行氏、佐藤宏明氏、山本裕之氏、西村直樹氏、半田祐一氏、岸野斉氏に感謝する。またモーター駆動スライドポテンシオメーターをご提供いただいたアルプス電気(株)稲垣一哉氏に感謝する。本研究は MIT メディアラボ TTT コンソシームの助成により行われた。

参考文献

- [1] Thomas H. Massie and J. K. Salisbury: The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects; *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 295-302 (1994)

- [2] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms; *Proc. CHI 1997*, pp. 234-241 (1997)
- [3] Matt Adcock, Matthew Hutchins, and Chris Gunn: Haptic Collaboration with Augmented Reality; *SIGGRAPH 2004 Posters*, p. 41 (2004)
- [4] Monica Bordegoni and Umberto Cugini: Create Free-form Digital Shapes with Hands; *Proc. GRAPHITE 2005*, pp. 429-432 (2005)
- [5] Michele Fiorentino, Raffaele de Amicis, Giuseppe Monno, and Andre Stork: Spacedesign: A Mixed Reality Workspace for Aesthetic Industrial Design; *Proc. ISMAR 2002*, pp. 86-94 (2002)
- [6] Steven Schkolne, Michael Pruett, and Peter Schröder: Surface Drawing: Creating Organic 3D Shapes with the Hand and Tangible Tools; *Proc. CHI 2001*, pp. 261-268 (2001)
- [7] GeOrb; <http://www.globalhaptics.com/product.html>
- [8] Tovi Grossman, Ravin Balakrishnan, Gordon Kurtenbach, George Fitzmaurice, Azam Khan, and Bill Buxton: Creating Principal 3D Curves with Digital Tape Drawing; *Proc. CHI 2002*, pp. 121-128 (2002)
- [9] Ben Piper, Carlo Ratti, and Hiroshi Ishii: Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis; *Proc. CHI 2002*, pp. 355-362 (2002)
- [10] David Anderson, James L. Frankel, Joe Marks, Aseem Agarwala, Paul Beardsley, Jessica Hodgins, Darren Leigh, Kathy Ryall, Eddie Sullivan, and Jonathan S. Yedidia: Tangible Interaction + Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling; *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 393-402 (2000)
- [11] Hiroyasu Ichida, Yuichi Itoh, Yoshifumi Kitamura, and Fumio Kishino: Interactive Retrieval of 3D Shape Models using Physical Objects; *Proc. MULTIMEDIA 2004*, pp. 692-699 (2004)
- [12] Ja Yong Park and Jong Weon Lee: Tangible Augmented Reality Modeling; *Lecture Note in Computer Science*, 3166, pp. 254-259 (2004)
- [13] Tovi Grossman, Ravin Balakrishnan, and Karan Singh: An Interface for Creating and Manipulating Curves using a High Degree-of-freedom Curve Input Device; *Proc. CHI 2003*, pp. 185-192 (2003)
- [14] Gian Pangaro, Dan Maynes-Aminzade, and Hiroshi Ishii: The Actuated Workbench: Computer-controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces; *Proc. UIST 2002*, pp. 181-190 (2002)
- [15] Dan Rosenfeld, Michael Zawadzki, Jeremi Sudol, and Ken Perlin: Physical Objects as Bidirectional User Interface Elements; *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(1), pp. 44-49 (2004)
- [16] Shunsuke Yoshida, Kenji Susami, Haruo Noma, and Kenichi Hosaka: Proactive Desk: New Haptic Interface and Experimental Evaluation; *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E890B, No. 2, pp. 320-325, (2006)
- [17] 平田亮吉, 星野洋, 前田太郎, 舘暲: 人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.1, No.1, pp. 23-32, (1996)
- [18] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi, and Ryo Kawamura: Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics; *Proc. SIGGRAPH 2001*, pp. 469-476 (2001)
- [19] Christopher R. Wagner, S. J. Lederman, and Robert D. Howe: A Tactile Shape Display using RC Servomotors; *Proc. the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (2002)
- [20] Masashi Nakatani, Hiroyuki Kajimoto, Dairoku Sekiguchi, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi: 3D Form Display with Shape Memory Alloy; *Proc. 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 179-184 (2003)
- [21] Y. Haga, W. Makishi, K. Iwami, K. Totsu, K. Nakamura, and M. Esashi: Dynamic Braille Display using SMA Coil Actuator and Magnetic Latch; *Sensors and Actuators A*, 119, pp. 316-322 (2005)
- [22] Northrop Grumman: TerrainTable; http://www.ms.northropgrumman.com/images/TerrainTable_FS.pdf
- [23] Ivan Poupyrev, Tatsushi Nashida, Shigeaki Maruyama, Jun Rekimoto, and Yasufumi Yamaji: Lumen: Interactive Visual and Shape Display for Calm Computing; *SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies*, p. 17 (2004)
- [24] Shinji Uchiyama, Kazuki Takemoto, Kiyohide Satoh, Hiroyuki Yamamoto, and Hideyuki Tamura: MR Platform: A Basic Body on Which Mixed Reality Applications are Built; *Proc. ISMAR 2002*, pp. 246-253 (2002)

(2007年12月10日受付)

[著者紹介]

穴吹 まほろ (正会員)



1998年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年キャノン(株)入社。現在、同社映像情報処理技術開発センターに所属。マルチモーダルHCI研究開発に従事。1998年より2001年まで(株)

MRシステム研究所に出向。2004年より2006年までMITメディアラボ、タンジブル・メディア・グループ客員研究員。日本バーチャルリアリティ学会、ACM各会員。

石井 裕 (非会員)



Photo credit:
Webb Chappell

1980年北海道大学大学院情報工学専攻修士課程修了。同年電電公社(現NTT)入社。

1988年より1994年までNTTヒューマン・インターフェイス研究所でCSCW研究に従事。1992年北海道大学にて工学博士号取得。

1993年より1994年までトロント大学客員助教授。1995年よりMITメディアラボ教授ならびにタンジブル・メディア・グループ・ディレクター。以来、新HCIコンセプトTangible Bitsを追求。2001年MITよりデニシア(終身在職権)取得。2006年ACM SIGCHIよりCHI Academy受賞。2007年よりMITメディアラボ副所長。