情報処理学会論文誌　Vol. 51　No. 2　314-323 (Feb. 2010)

空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイスの機能設計と評価

木村朝子[†]　上坂晃雅[†,††]　柴田史久[†]　田村秀行[†]

本研究では，様々な空間型作業のための新しい「道具型デバイス」を提案する．道具型デバイスには，日頃慣れ親しんでいる既存の道具に近い形状と，操作時の触感や操作音などを活用することで，ユーザがその用途や利用方法を直観的に把握することができるという特徴がある．また，我々が提案する道具型デバイスは，実世界での作業により近づけるため，実世界同様，目的に応じて異なったデバイスに持ち替えて利用できる「ツールセット」を指向している．新規ツールセットの最初の道具型デバイスとして，選択・移動用の対話デバイスであるピンセット型デバイスを選び，これを実現した．本論文では，道具型デバイスの基本概念の整理から始め，ツールセットの意義や要点を述べたうえで，ピンセット型デバイスの機能設計，実装，評価実験結果に関して詳述する．

Function Design and Evaluation of Tool Device Facilitating Pick and Move Manipulation in Spatial Works

Asako Kimura,[†1] Akimasa Uesaka,[†1,*1]
Fumihisa Shibata[†1] and Hideyuki Tamura[†1]

In this paper, we present a concept of our novel interaction devices; ToolDevice, which is for various operations in large electric working space. They imitate not only the shapes of existing tools and their usages, but also the tactile and audio sensation to increase presences of virtual objects and improve operational feelings. Thus, the user easily figures out how to use the tools. Additionally, ToolDevice is a set of interaction devices using a metaphor of existing tools which are familiar in everyday life. In the first example of ToolDevice, we developed TweezersDevice for pick and move manipulation in large space. In this paper, we firstly describe the concept and meanings of our new ToolDevice, then elaborate the function design of TweezersDevice, its implementation and the results of evaluation experiments

1. はじめに

近年，コンピュータの処理能力の向上，電子化された作業の増大とともに，狭いモニタ画面上での平面的な作業を前提とした WIMP 型 GUI の限界が感じられるようになってきた．とりわけ，広い作業領域が必要な各種設計作業，多種多様なデータを一挙に扱うレイアウト作業，3 次元物体への操作と奥行き知覚が必要な造形作業などでその傾向が顕著である．

このため，情報やデータを実世界で実物に触れる感覚で操作する「実世界指向インタフェース 1)」や「タンジブルインタフェース 2)」を導入し，より効果的に，より直観的に対話操作ができる方法が期待されている．

実際，このような考えに基づき，これまでに多くの魅力的な対話デバイスが開発されてきた．たとえば，Underkoffler ら 3) は，レンズや建物を模した実物体を手で動かすことで，光の屈折や影のシミュレーションを行う対話デバイスを提案している．また，Ryokai ら 4) は，ブラシ型の対話デバイスを導入し，新しい描画ツールとして I/O Brush を実現している．しかし，こうした対話デバイスの大半は，その用途ごとに検討・提案されたものであり，様々な作業を支援するだけの汎用性は有していない．

そこで本研究では，だれもが直観的に利用でき，様々な空間型作業（ここでいう「空間型」は複合現実感（Mixed Reality; MR）技術を利用する立体視可能なシステムや，プロジェクタ投影タイプ，テーブルトップ型のシステムを含む）に幅広く用いられ，対話操作を円滑にする道具型の対話デバイスの開発を行っている．

今日，多くの人々が利用している既存の道具は，良いアフォーダンスを持つと同時に，操作に関するメンタルモデルが幼少の頃からユーザの中に形成されている．このような道具の特性を対話デバイスに利用できれば，ユーザに正しい操作イメージを与えるだけでなく，直観的な操作が可能になると考えられる．

我々が提案する新しい「道具型デバイス」は，実世界同様，目的に応じて異なったデバイスに持ち替えて利用できる「ツールセット」を指向している．これは，従来の研究開発事例をふまえつつ，道具型デバイスが備えるべき要件，利用者に提供すべき機能と利用時の形態も考慮して構想し結果得た研究姿勢である．

この構想の下で，新規ツールセットの最初の道具型デバイスとして，選択・移動用の対話デバイスであるピンセット型デバイスを選び，これを実現した．本論文では，以下，道具型デバイスの基本概念の整理から始め，ツールセットの意義や要点を述べたうえで，ピンセット型デバイスの機能設計，実装，評価実験結果に関して詳述する．

2.　道具型デバイス

2.1　道具型デバイスの基本概念

ある道具が，特別な学習負担なしに利用できる場合は，その道具のデザイン自体に，どう使えばよいかが備わっていることが多い．このような特性は「アフォーダンス」と呼ばれている 5)．たとえば，ピンセットは，「掴む」「放す」動作を二股の形状からアフォードしている．長い歴史を持つ既存の道具は，良いアフォーダンスを有していると同時に，子供の頃からの利用経験で，我々の中に操作に関するメンタルモデルが形成されていると考えられる．

我々が提案する「道具型デバイス」は，慣れ親しんできた既存の道具の形状とその道具ならではの操作感（触感や操作音）を活用することで，ユーザに正しい操作イメージを与えるだけでなく，その用途や利用方法を直観的に把握させようとするものである．

2.2　対話デバイスの汎用度・専用度

コンピュータや電子機器などの対話デバイスを「汎用」と「専用」に分類し，1 つの軸上にプロットすると図 **1** のようになる．ただし，「汎用（versatile)」とは，特定の用途に限定した専用のものではなく，複数の用途に利用可能なことを意味しており，「万能（almighty)」とは異なる．本論文中で「汎用性が高い」というのは，「用途限定の度合いが低い」という意味であり，他の同程度の汎用性のあるものと比べて，精度・操作性・信頼性の面で優れているという意味ではない．



図 1　デバイスの汎用と専用
Fig. 1 General and particular purpose devices.

キーボードやマウスは，いうまでもなく汎用度が高い．ゲームパッドは，用途がある程度限定されるので，キーボードやマウスよりは専用寄りとなる．一方，パイロット養成用の本格的なフライトシミュレータでは，実機と同等の材質と機能を持つコクピットを備えている．これは明らかに専用目的の機器である．それが，PC ゲーム，TV ゲームレベルのフライトシミュレータとなると，機能を単純化・抽象化した操縦桿やラダーペダルを用いるので，専用度はやや低くなる．ビデオゲーム「電車で GO!」で用いる運転手用ハンドルを模したコントローラも，同じレベルであると考えられる．

本研究が目指すのは，この軸上で中間に位置する「準汎用デバイス」である．その意味するところは，専用デバイスのように見た目や手触りから用途が分かり，かつ汎用デバイスのように柔軟な操作が可能なデバイスである．さらに本研究では，デバイスをより直観的に利用するため，1 つのデバイスに多種多様な機能を持たせた万能型デバイスではなく，目的に応じて異なった道具に持ち替えて利用できるツールセットを指向している（図 **2**）．このような考え方を，我々は「最も適した道具を手にして使う」という意味で WYTIWIMF（What You Take Is What Is Most Fitting）と呼ぶ．研究方針としては，考えうる道具のすべてを実現するのではなく，空間型の作業で重要と考えられる操作を分類・抽象化し，その操作に適した道具のみを実現して，その有用性を確かめる．



図 2　ツールセット
Fig. 2 Tool set.

2.3　想定する操作内容

本研究では，空間型の作業として，広い作業領域が必要な設計作業，多種多様なデータを一挙に取り扱うレイアウト作業，3 次元物体操作と奥行き知覚が必要な立体造形作業などを想定し，それらを実現する操作として「選択・移動」「加工」「描画」の 3 種類に絞り込んだ．これらは，2 次元ディスプレイとマウスが苦手とする操作である．

(1) **選択・移動**：実世界で手やピンセットを使って物体を把持・移動するのと同様の感覚で 2 次元/3 次元空間中の仮想物体（CG）を選択・移動する．

(2) **加工**：実世界でハンマやナイフなどを使って造形を行うのと同様の感覚で，CG に対して造形を行う．

(3) **描画**：実世界で筆やペンなどを用いて描画を行うのと同様の感覚で，平面・立体物・自由空間に描画を行う．

2.4　解決すべき課題

我々の意図する道具型デバイスを実現するためには，以下の 4 つの課題を解決する

必要がある．

(1) 操作と道具のマッピング：：作業を抽象化した後，その作業に適した既存の道具を選択する．道具の形状からその操作をすぐに思いつくというだけではなく，他の用途に利用されない道具を選択する必要がある．このようにすることで，ユーザはデバイスの形状からその操作を一意にイメージすることが可能となる．

(2) 道具らしい触力覚感の実現：実物の道具の操作感により近づけるため，開発するデバイスに「道具らしい触力覚感」を提示する機構を内蔵する．ここで述べる「道具らしい触力覚感」とは，入力が正しく行えたかどうかのフィードバックを意味するのではなく，ユーザに道具らしい操作感を提示することを意味する．各デバイスについて，組み込み可能なサイズであり，かつユーザの操作を妨げない提示手法について検討する必要がある．また，あえて力覚提示装置は組み込まずに振動による触覚提示と LED による視覚提示，スピーカによる聴覚提示の組合せで擬似的な力覚提示を行う方法も考えられる．

(3) 操作の自由度：作業空間を 2 次元（空間内に設定した平面上）とするか，3 次元（空間全体）とするのかで，デバイスの実装形態が大きく異なる．前者の場合，拘束平面の設定方法を別途設計する必要がある．後者の場合，多自由度の動きを実時間で取得できる方法が必要である．

(4) 入力の強弱：「切る」「描く」などの操作では，より実世界の道具に近い感覚でデバイスを操作できるよう，その位置姿勢に加え，入力の強弱を取得する必要がある．たとえば実世界で筆を用いて描画する場合，筆を強く押し付ければ描画される線は太くなる．しかし，仮想物体や空間を対象としたときは押し付けるべき対象が存在しないため，デバイスの動きや，デバイスを持つ力など，入力された他の要素を強弱へ写像する方法を検討する必要がある．

2.5 関連研究

手にして実体感のあるデバイス，操作性の高いデバイスの研究開発例は数多いので，ここでは明示的に「道具のメタファ」を利用した関連研究との違いのみを述べる．

本研究の前身として，筆頭著者は，実体のないデジタル情報を機器間でやりとりするために，現実の道具を模した ToolDevice を提案した 6)．たとえば，スポイト型デバイスの先端をディスプレイ上の曲名リストに接触させ，楽曲データを「吸い出す」操作を行うことで，そのデータをデバイス内に格納することができる．また，スピーカに取り付けられたカップの上にデータを「押し出す」ことでその曲を再生することができる．ToolDevice は，目に見えない情報の選択・移動を対象としていたが，今回提案する「道具型デバイス」は作業空間を仮想空間や MR 空間に移し，実物体および，目に見える仮想物体に対して様々なインタラクションを行う点が異なっている．

また，日下志ら 7) は道具を利用した物体操作を VR 環境下で実現するため，日常的な道具の 1 つである箸を用い，仮想物体の移動操作手法を提案している．加藤ら 8),9) も，実物のパドルやコップを仮想のミニチュア家具や建物のレイアウトに利用している．これらの研究もある種の道具型デバイスと考えることはできるが，そのつど，単独の対話デバイスとして設計・開発されているのに対して，我々のツールセットは同じコンセプトの下に複数の道具が準備されている点が大きく異なる．

複数のデバイスを組み合わせて使用するツールセットという観点では，Schkolen ら 10) は，トングや磁石などの複数のツールや，手自体でのジェスチャを入力デバイスとして利用したモデリングシステム「Surface Drawing」を実現している．これに対して，本研究では道具の外観や操作方法を採用するだけでなく，ユーザが各デバイスの操作方法を直観的に理解できるように操作音や触力覚フィードバックもその道具らしいものとする点で，新たな進化を与えようとしている．

3. ピンセット型デバイス

3.1 選択・移動のための道具

本研究では，まず選択・移動を行う道具型デバイスの実現から着手した．コンピュータのユーザインタフェースではマウスによるドラッグ&ドロップで実現されるこの操作を，本研究では実世界でモノを移動するための道具であるピンセットに関連付けた．本論文では「ピンセット」を同様な形状と機能を有するもの（トング，ごみ掴み鋏など）を代表する象徴的な名称として用いる．

ピンセットはその先端でモノを挟む道具で，側面を指で押すことにより，その間にある物体を簡単に挟むことができる．また，挟んだ物体の硬さや大きさを把持に必要な力から推測することができるという特徴がある．

実世界でモノを選択・移動する道具には，ピンセットのほかにも，箸，スプーン，フォークなどが存在する．しかし，これらの道具は，選択・移動以外にもモノ（食べ物）を切る，潰すなどの用途が考えられる．

これに対して，ピンセットは選択・移動に特化した道具であり，その形状から選択・移動以外の用途を想像する余地がほとんどない．すなわち，ユーザはピンセットの外観から，移動・選択という用途と，その使い方を容易に想像することができると考えられる．ピンセットには，主たる操作対象がピンセットの大きさに制限される，複数の対象を 1 度に選択することができないなどの制約がある．しかし，このような制約に対しては，操作対象の大きさに合ったピンセットを使用する，複数選択に適した道具型デバイスを使用するなどで解決できると考えられる．

次節以降で，上記の概念を実現するピンセット型デバイスの機能設計結果を述べるが，これは単にピンセットに似せた道具を作ろうというものではなく，その後に「加工に適したデバイス」「描画に適したデバイス」の実現が控えていることを想定したうえでの設計である．すなわち，機能実現の方法や実装形態と外観に対する Look & Feel

の共通化，コンピュータとのデータ授受方法の統一を念頭においているわけである．

3.2　ピンセット型デバイスの設計と試作

【外観】

図 **3** に本研究で試作したピンセット型デバイスの外観を示す．ピンセット型デバイスの外観は，一般的なピンセットを容易にイメージできるデザインとした．デバイスの大きさ，形状など必ずしも 1 種類と限定する必要はないが，機能検証と実装のしやすさから，まずは図に示す大きさのものを実現した．

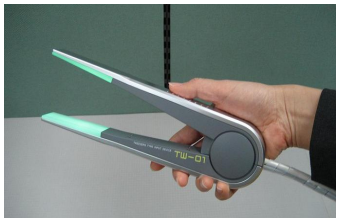


図 3　ピンセット型デバイスの外観
Fig. 3 TweezersDevice.

【内部機構】

図 **4** にピンセット型デバイスの内部構造を示す．ピンセット型デバイスを使って空間に配置された仮想物体を選択・移動するためには，まず以下の 2 つの機能が必要である．

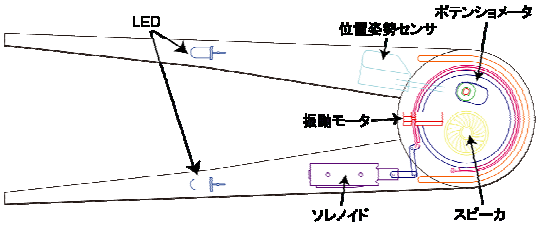


図 4　内部機構
Fig. 4 Mechanism.

(1) **位置姿勢検出機構**：仮想物体がピンセット型デバイスで挟める（選択できる）位置にあるかどうかを判定したり，ピンセット型デバイスで選択した仮想物体をデバイスに追従して表示したりする機能．

(2) **挟み幅検出機構**：仮想物体を挟んだか判定するため，ピンセット型デバイスの挟み幅を検出する機能．

試作デバイスでは，(1) 用に Polhemus 社製の磁気センサ 3SPACE FASTRAK を，(2) 用に一般的な回転式ポテンショメータを内蔵する．実物のピンセットでは，挟むモノの大きさに応じて，必要な挟み幅が変わる．ピンセット型デバイスでも，仮想物体が大きい場合はデバイスを少し閉じるだけで選択でき，小さい場合は挟み幅がその仮想物体の大きさと同じになるまで選択されないよう，デバイスの挟み幅は 64 段階で取得する．

次に操作結果の応答，確認を視・聴・触力覚に対して行うために，以下の 4 つの情報を提示する

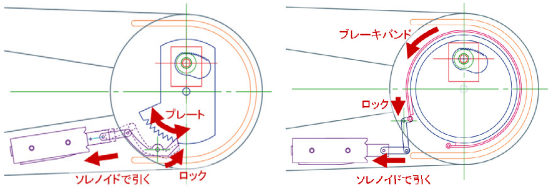
(3) **視覚提示**：デバイスの動作確認のため，デバイスの状況を光で提示する．

(4) **聴覚提示**：あたかもピンセット型デバイスが仮想物体と接触したことで音が発生したように印象付けるため，音をデバイス本体から提示する．

(5) **触覚提示**：操作対象が動きをともなう仮想物体であるときに，その動きを提示するため振動を提示する．またこの振動は，下記(6) のような反力ではなく，機構の単純な振動を操作結果の応答・確認のために提示することで，どの程度操作感が得られるのかを検証するためにも利用する．

(6) **反力提示**：ピンセットでモノを挟もうとするとき，ピンセットの両先端の内側の面がそのモノに触れると，ピンセットの側面をそれ以上押し込んでも挟み幅は小さくならず，ユーザは指に反力を感じる．ただし挟んでいるモノの硬さ・軟らかさに応じてこの反力は異なり，硬いモノを挟んでいる場合は，側面をどんなに強く押しても挟み幅は変わらないが，軟らかいものを挟んでいる場合は，側面を押す強さに応じて挟み幅が変化する．以上のような反力を提示する．

試作デバイスでは，(3), (4), (5) を実現するためデバイス内部に RGB 3 色の LED，小型スピーカ，振動モータを内蔵する．また(6) の反力については，以下のような機構を内蔵する．まず何も掴んでいないピンセットの金属バネの触感を再現するために，ピンセット型デバイスの支点にバネを内蔵する．また仮想物体の大きさ・硬さに応じて反力を提示する機構として，本研究では，ラチェット方式とドラムブレーキ方式の 2 種類の反力提示機構を考案・試作した（図 **5**）．



(a) ラチェット方式　(b) ドラムブレーキ方式
図 5　反力提示機構
Fig. 5 Force feedback mechanisms.

ラチェット方式は，ソレノイドでロックツメを上下させ，プレートの溝に咬ませることで，一定角度ごとにピンセット型デバイスの開口角度をロックする．この方式では，仮想物体の大きさに応じて先端の挟み幅をロックすることができるが，仮想物体の硬さに応じた反力提示はできない．ドラムブレーキ方式は，ソレノイドがブレーキバンドを引き，ドラムを締め込むことでブレーキがかかり，ピンセット型デバイスがそれ以上閉じないようにする．この方式では，仮想物体の大きさに応じて挟み幅を固定するだけでなく，仮想物体が軟らかい場合ブレーキを緩めることで，デバイスの側面を強く押すとブレーキバンドが滑り，仮想物体の軟らかさを提示することができる．

3.3 ピンセット型デバイスを用いたインタラクション

3.2 節で述べたピンセット型デバイスを用いることで，以下のようなインタラクションが可能である．

(a) **選択（掴む）**：ピンセット型デバイスで仮想物体を挟むことでその物体の選択を行う．デバイスの 3 次元位置は磁気センサより取得可能であるため，3 次元空間内に配置/移動している仮想物体を直接選択することができる．またドラムブレーキ方式のピンセット型デバイスでは，もう 1 段階強く挟むことで仮想物体が変形する/仮想物体の詳細情報が提示されるなどの操作も考えられる．

(b) **移動・回転**：選択された仮想物体を，3 次元空間の任意の場所へ移動することができる．また，磁気センサによってデバイスの位置だけでなくその姿勢も取得可能であるため，デバイスを回転しながら移動させることで，仮想物体の移動と回転を同時に行うことが可能である．

(c) **選択解除（放す）**：仮想物体を把持している力を緩め，デバイスの先端を開くことにより，仮想物体を放すことができる．この際，仮想物体をその場で放す，卓上などに落とす，投げるなどの操作が考えられる．(ここまで OK)

4. 体験システム

4.1 システム構成

ピンセット型デバイスの機能を検証するために，作業空間を MR 空間としたテストベッド，すなわち試作したピンセット型デバイスで MR 空間中の仮想物体を選択，移動・回転，選択解除することが可能なシステムを構築した（図 **6**）．ピンセット型デバイスの入出力制御は，デバイス制御用 I/O BOX を介してデバイス制御用 PC（Panasonic 製 Let’s note R5）からシリアル通信で行う．ピンセット型デバイスと仮想物体が選択可能な位置関係にあるか，仮想物体を選択したかどうかは 3.2 節で述べたデバイス内蔵の磁気センサとポテンショメータの情報をもとに判断する．ピンセット型デバイスが仮想物体を選択すると LED が選択した物体に応じた色に点灯，効果音が再生，振動モータの稼動，物体の大きさに応じた開口角度での反力提示がデバイス制御用 I/O BOX を通じて行われる．MR 空間の提示は，キヤノン製の MR プラットフォーム・システムを用い，ユーザはビデオシースルー型 HMD（Canon VH-2002）を装着することで，現実世界の光景と CG の実時間合成結果を確認することができる．

4.2 体験内容

体験システムとして，CG のごみを実物のごみ箱に分別するという，ピンセット型デバイスのすべての機能を盛り込んだシステムを作成した．

体験システムは，ピンセット型デバイス 1 つで行うことを想定した作業で，デバイスのすべての機能を活用することができる，選択・移動操作の有効性実証の例題として実装した．具体的には，ピンセット型デバイスに向いている事例として，PC 画面よりは広い作業空間で，3 次元物体の選択・移動を行う事例を考え，その中でごみの分別を実装した．ごみの分別は，現実に MR 環境で行うべき作業ではないが，実際に稼働する事例を通じて機能検証，有用性評価をするためには十分と考えた．

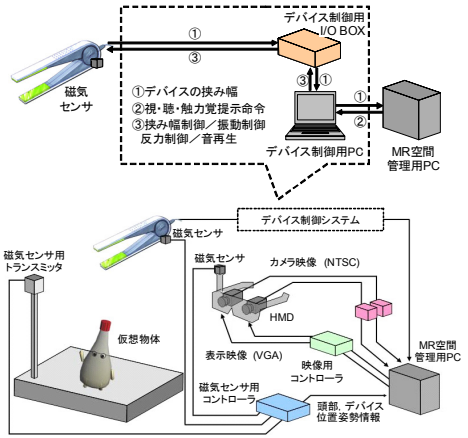


図 6　システム構成
Fig. 6 System configuration.

体験システムでは，体験者がピンセット型デバイスで CG のごみを選択する（図 **7** (a)）と，スピーカから効果音（ごみの悲鳴）が提示され，選択されたごみは各々に設定されたアニメーション（缶がつぶれる，暴れるなど）を行う．ごみが暴れるアニメーションの際には，その動きに応じて振動を提示する．体験者は挟んだごみを対応するごみ箱の上で放すことで分別を行う（図 7 (b)）．ごみは，放り投げることも可能である．デバイスの開口角度のロックはごみの大きさに応じて決定する．ドラムブレー

キ式のデバイスを用いる場合は，各ごみのやわらかさも提示する．体験者はごみを選択した状態でデバイスを動かすことで，ごみを 3 次元空間中の任意の位置に動かすことができる．また，デバイスを回転させることで CG のごみを様々な方向から観察することができる（図 7 (c)）．体験終了後，正しく分別できた数と分別の早さに応じた評価が表示される．



(a) 仮想物体の選択　(b)選択を解除



(c) 仮想物体の移動・回転

図 7　ピンセット型デバイスによるインタラクション
Fig. 7 Interactions using TweezersDevice.

4.3　運用結果

本システムは，予感研究所 2（2008 年 7 月，於東京），UIST2008（2008 年 10 月，於米国カリフォルニア州），HIS2008（2008 年 9 月，於大阪）において技術展示を行い，合計 700 人以上（1 件目は小さな子供も含む一般人，後の 2 件はユーザインタフェース分野の専門家）が体験した．運用の結果，多くの体験者が操作している様子を 1 度見ただけで操作方法を学習し，仮想物体を容易に選択・移動していた．また，今回デバイスに導入した機構に関しては，聴覚・触覚・力覚ともに有用であったが，特に反力提示は，操作感が向上すると好評価であった．視覚の提示は，HMD 越しでは LED の色変化が分かりにくいことが分かった．

5.　評価実験

2.4 節で解決すべき課題としてあげた「操作と道具のマッピング」と「道具らしい触力覚の実現」が，意図したとおり達成できているかを確認するために，以下の 2 つの実験を行った．

5.1　実験 1：操作と道具のマッピングの評価

5.1.1 実験目的

実験 1 では，「操作と道具のマッピング」と直観性の関係を評価する．ただし，本論文では直観性を「操作を教示されなくても，すぐに，正しく操作方法を発見できる性質」と定義する．具体的には，ピンセット型デバイスとハンマ型デバイス，スティック型デバイス（Polhemus 社製ペン型デジタイザ（ST-8）），ゲームパッド（サンワサプライ社製 JY-P59UG）（図 **8**）の計 4 種類を用いて仮想物体を選択・移動・解除させるタスクを課し，主観評価および操作方法を発見・実行するまでの時間を比較する．本実験では，以下のような理由からピンセット型デバイスとの比較対象として上記 3 種類のデバイスを選択した．



(a) スティック型デバイス



(b) ハンマ型デバイス



(c) ゲームパッド

図 8　比較する対話デバイス
Fig. 8 Interaction devices.

・入力デバイスに道具のメタファを利用する効果を確認するため，一般によく利用される入力デバイスで，道具のメタファとは無関係のゲームパッドを選択した．

・一方，異なる操作を行う道具のメタファを適用したときの悪影響について確認するため，「叩く」ための道具であるハンマ型のデバイスを選択した．

・道具の形状からその操作をすぐに思いつくというだけではなく，他の用途に利用されない道具を選択する必要性を確認するために「選択（刺す）・移動」だけでなく，「掻き混ぜる」「叩く」など，様々な操作を行う道具の代表としてスティック型デバイスを選択した．

・実験条件を統一するため，本実験では聴覚および反力・触覚の提示は行わない．

5.1.2 実験内容

各デバイスの操作方法（表 **1**）は説明せず，被験者にできるだけ早くタスクを実行することを求め，デバイスごとに最初の 1 試行に要する時間（球を選択してから立方体領域で解除されるまでの時間）を測定する．被験者は，各デバイスを初めて使用する成人 10 名である．なお，各デバイスを体験する順序は体験者ごとにランダムとした．実験は以下の手順で行う．なお，実験の様子はビデオで撮影し，正しい操作を発見するまでにどのような操作を行ったか分析する．

(1) 被験者に 4 種類のデバイスの中からランダムに 1 つ手渡し，初期位置 I1 に配

置された直径 80mm の球を選択し，立方体領域（1 辺の長さが 150mm の半透明の立方体）に移動させ解除するよう指示する（図 **9**）．各デバイスの操作方法はいっさい教示せず，試行錯誤した結果操作方法を発見できなかった場合は「分からない」という回答を許し，その時点で操作を終了する．

(2) 実験終了後，デバイスを操作方法の分かりやすい順に順位付けさせるとともに，なぜそのように評価したかコメントさせる．

表 1　操作方法
Table 1 Operation methods.

	直接／間接操作	選択方法	解除方法
ピンセット型デバイス	直接操作	掴む	放す
スティック型デバイス	直接操作	刺す	振る
ハンマ型デバイス	直接操作	叩く	振る
ゲームパッド	間接操作	ボタンを押す	ボタンを押す

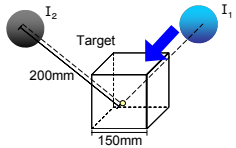


図 9　実験 1，2 の操作イメージ
Fig. 9 Operation image of experiment 1, 2.

5.1.3 結果と考察

図 **10** に各デバイスの平均タスク実行時間を示す．図より，ピンセット型デバイスが最も速く，ハンマ型，スティック型デバイス，操作ステップ数の多いゲームパッドと続くことが分かる．また主観評価の結果（図 **11**），すべての被験者がピンセット型デバイスの操作方法が一番分かりやすいと回答し，続いてハンマ型デバイス，ゲームパッド，スティック型デバイスの順で評価が高かった．以上の結果から，ピンセット型デバイスは，他のデバイスと比べ操作方法をすぐに発見でき，直観的であることが分かる．

実験中の被験者の様子やコメントを分析してみると，ピンセット型デバイスは，すべての被験者が迷うことなく，すぐに操作方法を発見していた．一方，スティック型デバイスは，叩く，回すなど様々な操作を試みるものの「刺す」という操作方法をなかなか思いつかない被験者が多かった（断念する被験者も 1 人いた）（表 **2**）．ハンマ型デバイスは，選択・移動の道具ではないため，すぐには操作方法を思いつかない様子であったが，逆に叩く以外の操作方法を思いつかず，試しに叩いてみたところたまたま選択・移動操作が実行されたという様子であった．しかし，ほとんどの被験者が 1 度の試行だけで操作方法を発見できたため，スティック型よりもハンマ型デバイスの評価が高くなったと思われる．ゲームパッドも，最初はどのボタンを押せばよいか迷い，被験者が試行錯誤する様子が見られた．しかし，ボタンを押す以外の操作方法がないため，時間はかかるものの最終的にはすべての被験者が操作方法を発見できていた．

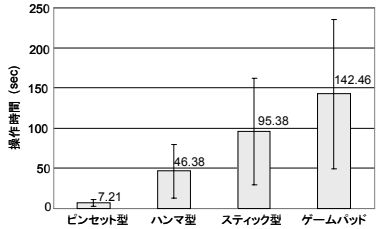


図 10　平均操作時間
Fig. 10 Average operate times.

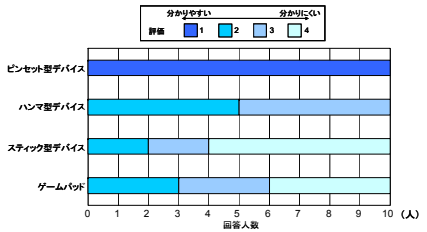


図 11　実験 1 の主観評価結果
Fig. 11 Results of subjective assessment in experiment 1.

表 2　実験中に行われた操作
Table 2 Operations done in experiment 1.

	選択	解除
ピンセット型デバイス	掴む	放す
ハンマ型デバイス	叩く，回す	振る
スティック型デバイス	刺す，つつく，回す，振る，叩く	振る
ゲームパッド	ボタン操作	ボタン操作

以上の分析から，操作方法の直観性を実現するためには，操作と道具のメタファの

正しいマッピングと，他の用途に利用されない道具を選択することの両方が重要なことが分かった．

参考のため，図 **12** に，実験 1 と同じ被験者に各デバイスの操作方法を教えた後，5.1.2 項の(1) と同様の試行をそれぞれ 30 回行った場合の平均タスク実行時間を示す．図より，操作方法を教示したことで，ピンセット型，ハンマ型，スティック型デバイスともに，初回から 2〜3 秒程度で操作されており，また習熟後のタスク実行時間もこれらのデバイス間では，大きく違わないことが分かる．

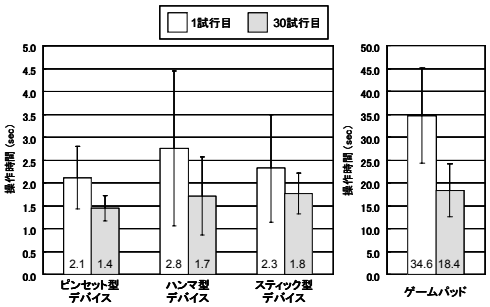


図 12　操作方法学習後の平均操作時間の推移
Fig. 12 Changes in average operate time after learning the operation methods.

5.2　実験 2：道具らしい触力覚

5.2.1 実験目的

道具らしい触力覚として，3.2 節で述べたラチェット方式，ドラムブレーキ方式，各反力提示機構を導入することの有用性を評価する．仮想物体を選択・移動させるタスクを課し，主観評価と操作時間を比較する．

5.2.2 実験内容

反力提示なし，ラチェット方式，ドラムブレーキ方式の 3 タイプのピンセット型デバイスを用いて，初期位置 I1 に配置された直径 80mm の球を選択し，立方体領域（1 辺の長さが 150mm の半透明の立方体）に移動させ解除する試行を 30 回行わせる（図 9）．被験者には，できるだけ早くタスクを実行することを求め，各デバイスで 1 試行に要する時間（球を選択してから立方体領域で解除されるまでの時間）を測定する．反力提示機構の順序は体験者ごとにランダムとし，実験終了後，各反力提示機構に関して「物体を掴んだような感触を感じたか」を 5 段階（1 : まったく感じなかった，2 : あまり感じなかった，3 : どちらでもない，4 : 感じた，5 : 非常に感じた）で回答させ，自由にコメントさせる．本実験でも，聴覚提示は行わない．被験者は成人 10 名である．

5.2.3 結果と考察

実験結果を図 **13** に示す．図より，ドラムブレーキ方式の評価が最も高く，実物のピンセットに近い触感を提示することで，物体を掴んだという感覚が強くなることが分かる．被験者からは「物体を掴んだという感触があった」「押し込める感覚がある方が掴んだという触感を感じた」と好評であった．

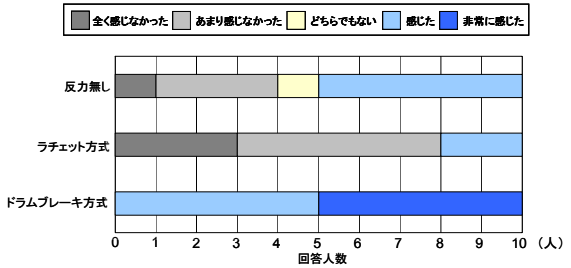


図 13　実験 2 の主観評価結果
Fig. 13 Results of subjective assessment in experiment 2.

また，ラチェット方式は反力を設定しない場合と比べても評価が低かった．被験者からは「ドラムブレーキ方式と比べると操作しにくかった」「実物のピンセットの挙動とは異なっているので操作しにくかった」というコメントが得られた．ラチェット方式の，仮想物体を選択すると選択時の挟み幅でロックされ，いくら強く押し込んでもそれ以上押し込むことができないという特徴が嫌われる結果となった．

6.　むすび

慣れ親しんだ道具のメタファを利用することにより，電子作業空間とのインタラクションを円滑にする「道具型デバイス」の新しいツールセットを考案し，具体的にその 1 つを設計・試作したうえで，意図した機能を達成しているかどうかを評価した．

ここで「新しいツールセット」と称したのは，従来，個別もしくは散発的になされていた類似の研究開発事例を参考にしつつ，複数の対話デバイスが一連の道具群として準備され，利用に供されるという概念を導入したからである．このセット内では，個々の道具型デバイスに対する実在の道具のメタファと，使い方に一貫性があり，同じ程度のアフォーダンスが与えられていると考える点が，本研究のエッセンスである．

また，対象となる作業内容を抽象化して「選択・移動」「加工」「描画」の 3 種に絞り込んだ．その第 1 段として「選択・移動」に適した「ピンセット型デバイス」の機

能設計を行い，安定した試作機を開発したうえで，その評価を行った．ここで重視したのが「操作と道具のマッピング」であり，「道具らしい触力覚の実現」である．実験結果はいずれも良好で，意図したとおりの機能が達成されていることが実証された．

すでに，「加工」や「描画」に適したデバイスも開発中であり 11),12)，まもなく「ツールセット」として第 1 期品揃えが完成する．ただし，概念は共通するものの，個々のデバイスで達成できる機能や内部構造はかなり違うので，その実装方法や評価に関しては稿を改めて報告する．

謝辞　本研究は，JST のさきがけ研究「空間型メディア作品を強化する 7 つ道具型対話デバイス」（研究代表者：木村朝子）の支援によるものである．

参考文献

1)　暦本純一：“実世界指向インタフェース：実世界に拡張された直接操作環境”，情報処理，Vol. 43, No. 3, pp. 217 - 221, 2002.
2)　石井裕：“Tangible Bits：情報の感触／情報の気配”，同上，Vol. 39, No. 8, pp. 745 - 751, 1998.
3)　J. Underkoffler, B. Ullmer, and H. Ishii: “Emancipated pixels: Real-World graphics in the luminous room,” Proc. SIGGRAPH 99, pp. 385 - 392, 1999.
4)　K. Ryokai, S. Marti, and H. Ishii: “I/O Brush: Drawing with everyday objects as ink,” Proc. SIGCHI Conference on Human factors in Computing Systems (CHI 2004), pp. 303 - 310, 2004.
5)　D. A. Norman 著，野島久雄 訳：“誰のためのデザイン？”，新曜社，1990.
6)　池田洋一，木村朝子，佐藤宏介：“道具の持つアフォーダンスを利用した触覚フィードバックデバイス”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 7, No. 3, pp. 339 - 345, 2002.
7)　日下志友彦，北村喜文，正城敏博ほか：“手－道具－物体間のインタラクションを考慮した仮想箸による物体操作”，電子情報通信学会論文誌，Vol. J84−D−Ⅱ, No. 3, pp. 519 - 528, 2001.
8)　加藤博一, M. Billinghurst, I. Poupyrev ほか：“拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース”，芸術科学会論文誌，Vol. 1, No. 2, pp. 97 － 104, 2002.
9)　H. Kato, K. Tachibana, M. Tanabe, et al.: “MagicCup: A tangible interface for virtual objects manipulation in table-top augmented reality,” Proc. Augmented Reality Toolkit Workshop (ART 2003), pp. 85 - 86, 2003.
10)　S. Schkolne, M. Pruett, and P. Schroder: “Surface drawing: creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools,” Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2001), pp. 261 - 268, 2001.
11)　福田健悟，木村朝子，柴田史久ほか：“Top-Attachable ToolDevice：先端部が着脱可能な新しい道具型デバイス”，第 71 回情報処理学会全国大会講演論文集 (4)，2Y-2, pp. 163 - 164, 2009.

著者紹介



木村朝子（正会員）
1996 年大阪大学基礎工学部卒業．1998 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．同大学助手，立命館大学理工学部助教授，科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て，2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授．博士（工学）．実世界指向インタフェース，複合現実感，ハプテックインタフェースの研究に従事．2001 年より 2002 年まで Mayo Clinic にて Special Project Associate．ACM，IEEE，電子情報通信学会，ヒューマンインタフェース学会，日本バーチャルリアリティ学会の各会員．本学会山下記念研究賞，日本バーチャルリアリティ学会論文賞，同学会学術奨励賞等受賞．



上坂晃雅
2007 年立命館大学理工学部情報学科卒業．2009 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了．同年 4 月ソニー（株）入社．2006 年より 2009 年 3 月まで，ポスト WIMP 型インタフェース，道具のメタファを利用した道具型デバイスに関する研究に従事．



柴田史久（正会員）
1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．1999 年同研究科博士後期課程修了．大阪大学産業科学研究所助手を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授．現在，同情報理工学部情報コミュニケーション学科准教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング，複合現実感等の研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会，日本バーチャルリアリティ学会等の会員．日本バーチャルリアリティ学会論文賞，同学術奨励賞受賞．



田村秀行（正会員）
1970 年京都大学工学部電気工学科卒業．工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授．現在，同情報理工学部メディア情報学科教授．工学博士．パターン認識，画像情報処理，マルチメディア，バーチャルリアリティ等の研究推進と実用化に従事．本学会論文賞，日本バーチャルリアリティ学会論文賞，人工知能学会功労賞等受賞．編著書：『コンピュータ画像処理』（オーム社），『デジタル映像』（日本経済新聞社）等．IEEE，ACM，電子情報通信学会，人工知能学会，映像情報メディア学会，日本バーチャルリアリティ学会等の各会員．