

道具型デバイスを活用した複合現実空間での木材加工

高見 雄介 木村 朝子 柴田 史久 田村 秀行

立命館大学大学院 理工学研究科 〒575-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: takami@rm.is.ritsumei.ac.jp

あらまし 我々は、誰もが直観的に利用でき、複合現実空間での作業に幅広く用いることができる「道具型デバイス」の研究を行っている。道具型デバイスは (1) 慣れ親しんだ既存の道具の形状とその道具ならではの触感・操作音を活用する, (2) 実世界と同様に、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する, という特徴がある。我々はこれまでに選択・移動操作に適した道具型デバイスを開発した。本研究では、次なる道具型デバイスとして複合現実空間における3次元物体への加工操作に適した「ナイフ/ハンマ型デバイス」を提案する。本稿ではその詳細とそのデバイスを用いた事例として木材加工システムを報告する。

キーワード 道具型デバイス, 複合現実感, ナイフ, ハンマ, 木材加工

Woodworking Using ToolDevice in Mixed Reality Space

Yusuke Takami Asako Kimura Fumihisa Shibata and Hideyuki Tamura

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

E-mail: takami@rm.is.ritsumei.ac.jp

Abstract We have proposed novel interaction devices for various operations in mixed reality (MR) space; ToolDevice that uses a metaphor of real-life tools which are familiar in everyday life. Such tools have good affordance, and at the same time, every user already has a mental model for their operation. These advantages not only guide users to the correct operation, but provide an intuitive operation. In the first example, we developed TweezersDevice for pick and move manipulations. In this paper, we introduce Knife/HammerDevice for modeling operations as a second device. We describe that the details and woodworking system using it as a pilot test.

Keyword ToolDevice, Mixed Reality, Knife, Hammer, Woodworking

1. はじめに

我々は、直観的に利用でき、複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間での作業に幅広く用いることができる対話デバイスとして、道具のメタファを利用した「道具型デバイス」の研究を行っている[1].

道具型デバイスは、慣れ親しんだ日常で用いる道具の形状とその道具ならではの触感・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、直観的な操作を可能にしている。また、先行研究の多くが単一のデバイスによって様々な操作が可能な万能型のデバイスを目指しているのに対し、本研究で提案するデバイスはより実世界での作業に近づくため、目的に応じて複数のデバイスの中から適したデバイスを手に取り利用する「ツールセット」を指向している。我々はこのような考え方を「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) と呼んでいる。

本研究では、このようなデバイスを実現する上で、考え得るすべての道具を実現するのではなく、まず MR 空間に適した作業として、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次元物体の操作が必要な造形作業を想定した。次に、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 (図1) に絞り込み、これら操作に適したデバイスの提案・実現を行っている。

まず初めに、選択・移動操作に適した道具型デバイスである「ピンセット型デバイス」を開発した。次に、

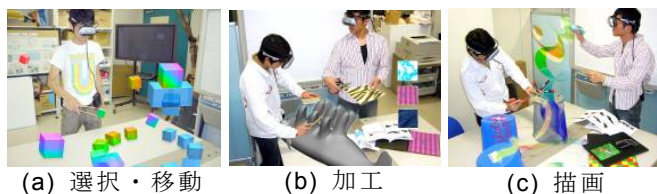


図1 想定する3種類の操作

加工操作に適した道具型デバイスとして「ナイフ／ハンマ型デバイス」を開発した．本稿では，デバイスの実現と，その運用事例として試作した「木材加工システム」について報告する．

2. 関連研究

Anagnostou ら[2]や Anderson ら[3]は実物体の組み立てブロックを用いて3次元形状を作成している．各種センサが埋め込まれたブロックを用いることで，組み立てられた形状からブロック同士の接続関係を取得し，その形状をコンピュータ上で再現することができる．Sheng ら[4]は3次元形状の生成や操作に，変形可能な実物体を介した指の入力を用いる手法を提案している．指先に取り付けた再帰性反射マーカを用いて指の位置を検出することで，「曲げる」「捻る」といった指の動作を2Dディスプレイ上のデジタルモデルに反映することができる．また，スポンジを介すことで，フィードバックを伴った直観的な操作を実現している．これらはいずれも，造型対象の物体に着目したインタフェースであり，積み木や粘土のメタファを利用して，組み立て，変形が可能な実物体を導入することで，あたかも仮想物体に直接接触しているかのような操作感を実現している．

一方，実世界の道具に着目したインタフェースを用いる研究も報告されている．Wesche ら[5]や吉田ら[6]はペン型のデバイスを用いて3次元形状を生成している．3次元位置姿勢センサを内蔵したペン型デバイスを用いて，空間中にスケッチを描くように操作することで自由な形状の線や表面を作成できる．Schkolne ら[7]の Surface Drawing では，3次元形状の生成や編集に手のジェスチャやハンドツールを用いている．このシステムでは，立体表示が可能なワークベンチを利用し，その上で手を動かすことで手の形状に応じた有機的な形状を生成することができる．また，生成した形状に対して消しゴムや磁石といったツールを用いて変形操作が行える．

これらの先行研究を踏まえ，本研究では実世界の道具の中でも実際に造型作業で用いられる道具に近い道具型デバイスを開発することで，より直観的な加工操作の実現を目指す．

3. 加工操作のための道具型デバイス

3.1. 実世界の加工道具

実世界の造型作業では多種多様な加工道具が用いられる．用いられる道具は造型対象の素材によって様々であり，例えば素材が木材であれば，ノコギリやヤスリ，鉋や金槌，彫刻刀などが用いられ，粘土であれば，スクレイパーやヘラ，ナイフやワイヤなどが用いられ

る．他にも，金属では，金切りバサミや溶接機，溶断機や金槌などが用いられ，石であればノミや金槌などが用いられる．このように実世界には加工道具が数多く存在し，これらすべてを道具型デバイスとして実現するのは現実的でない．

しかし，これら道具をそれぞれの道具で実現される加工操作で分類したとき，これらは，切る，叩く，削る，といった数種の操作に集約できる．そこで我々は，これら集約される加工操作に対し，それぞれに適したデバイスを実現していくこととした．本研究では，まず，切る，叩く加工操作を行うための道具型デバイスの実現から着手した．

3.2. ナイフ／ハンマ型デバイス

本研究では切る，叩く加工操作を行うためのデバイスを実現するに当たり，切る操作をナイフ，叩く操作をハンマにそれぞれ関連づけた．

ナイフは対象を切削するための道具で，柄の部分と切削部である刃で構成される．使用時は柄を持って刃を対象物に押しつけ，刃を押し込んだり，引いたりして用いる．また，ハンマは対象を打ち付けたり，潰したりする道具で，柄の部分とそれより重い頭部で構成される．使用時は柄を持って振り，その慣性で頭部を対象物に叩きつけて用いる．

前述のとおり加工操作は集約しても複数存在するため，それぞれの操作をピンセット型デバイスのように単一のデバイスで実現することは難しい．そのため，それぞれの操作を個別のデバイスとして実現することになるが，これはコスト面でも製作面でも負担となる．そこで，本デバイスでは電気掃除機のアタッチメントのような感覚で先端部を着脱，交換することで機能を切り替える「先端着脱方式」を取り入れることにした．

加工道具の形状に着目したとき，多くの道具は棒形状の柄とその先にあるそれぞれの器物から構成される．本デバイスもそれに倣い，各道具で共通な柄は「本体」として一つだけ実現し，道具それぞれの機能は「着脱部」として実現する．また，本体には各着脱部で共通して必要となる機構を内蔵し，この本体を着脱部が共用することで資源の効率化を図る．加えて，着脱部は各道具専用の機構を実装し，外観として形状や重さなど固有の特徴を取り入れることで，各々の道具らしい操作感を実現する．

【外観】

図2に本研究で開発したナイフ／ハンマ型デバイスの外観を示す．デバイスは前述のとおり先端着脱方式で実現しており，ナイフの着脱部，ハンマの着脱部，共通の本体から構成される．図ではナイフの着脱部と本体を接続している．

着脱部の外観は，一般的な「ナイフ」「ハンマ」を容



図 2 ナイフ／ハンマ型デバイス

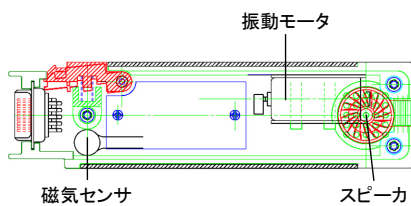


図 3 本体の内部機構

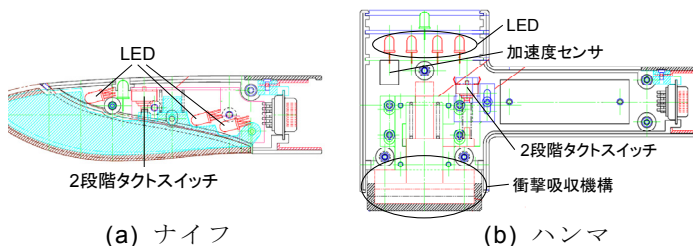


図 4 着脱部の内部機構

易にイメージできるデザインを取り入れた。本体の大きさは、持ちやすさを考慮して長さを約 125mm (着脱部接続時)、太さを約 110mm (外周) とした。また、それぞれの重さは本体、ナイフ着脱部ともに約 110g としたが、ハンマに関しては実物と同様、柄の部分より頭部が重くなるように着脱部に重りを入れ、約 250g となるようにした。

【内部機構】

道具型デバイスは、その道具ならではの操作感を実現するために、各種センシング機構やフィードバック機構を内蔵する。前述のとおり、着脱部にはナイフ、ハンマそれぞれ固有で用いる機構を、本体には共通して用いる機構を内蔵した。図 3 に本体の内部機構を示す。本体には次の機能、機構を内蔵した。

着脱部 ID 識別：着脱部の ID を識別する機能。ID 識別は、着脱部－本体接続コネクタの 4 つのピンを利用して実現しており、それぞれのピンの ON/OFF の組み合わせで合計 16 種類の ID 識別が可能である。

位置姿勢検出：デバイスが仮想物体を操作可能な位置にあるかを判定するために利用。空間中の 3 次元位置姿勢を検出するために Polhemus 社製磁気センサ

LIBERTY のレシーバを内蔵している。

聴覚提示：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機能。小型スピーカを内蔵している。

触覚提示：仮想物体を「切る」「叩く」操作をした際の触感を提示する機能。振動モータを内蔵している。

図 4 にナイフ、ハンマの着脱部それぞれの内部機構を示す。着脱部には次のような機能、機構を内蔵した。

接触判定：実物との接触を検出する機能。ナイフでは刃の部分が、ハンマでは頭部の片側がそれぞれ可動する機構となっており、操作面に対してデバイスを押し込むと、内蔵された 2 段階タクトスイッチが押下され、その強さが 2 段階で検出される。

視覚提示：動作確認のため、デバイスの状況を光で提示する機能。RGB 3 色の LED を複数内蔵している。ナイフでは刃の部分が、ハンマでは接触部の反対側がそれぞれ点灯する。

また、ハンマの着脱部には上記に加えて次の機能、機構を内蔵した。

加速度検出：叩く際の振り下ろし速度を検出するために利用。3 軸加速度センサを内蔵している。

4. 試作システム

4.1. MR 空間での木材加工

開発したナイフ／ハンマ型デバイスの機能を確認するための事例として、MR 空間での造型システムを試作した。試作システムでは直観的な操作を実現するために、誰もが過去に体験したことがある実世界の造型操作をシステムの操作体系に取り入れる。これにより、ユーザの操作に対するメンタルモデル形成を容易にし、初心者でも扱える直観的な造型システムを目指す。

実世界の造型作業は木材加工やクレイモデリング、金属加工や石材加工など様々である。その中でも、(1) 多くの人にとって経験があり、作業内容が容易に想像できる、また、(2) ナイフ／ハンマ型デバイスを効果的に用いることができると考えられる木材加工を想定作業とした。本システムでは開発したナイフ型デバイスを木材の切断に用いられるノコギリに、ハンマ型デバイスを木材同士の結合に釘とともに用いられる金槌にマッピングした。

試作した木材加工システムのイメージを図 5 に示す。

4.2. システム構成

【木材加工システム】

木材加工システムを実現するハードウェアとして図 6 の構成を用いた。MR 空間の管理・構築には Microsoft Windows XP OS、Intel Core2 Duo E4300 CPU、および 2048 MB RAM を搭載する PC を用いた。MR 空間の映像提示には両眼立体視が可能なビデオシースルー型

HMD (Head Mounted Display) である Canon VH-2002 を使用し、HMD カメラからの映像入力には ViewCast Osprey-440 ビデオキャプチャカードを、HMD ディスプレイへの出力には NVIDIA Quadro FX 1700 ビデオカードを用いている。また、HMD およびデバイスの位置姿勢情報の検出には Polhemus LIBERTY を用い、両者に取り付けられたレシーバと、適当な位置に固定されたトランスミッタ間の相対的な位置姿勢を連続的に取得している。

ソフトウェアとしては、開発環境として言語に C++/CLI, .NET Framework, グラフィックス API に OpenGL, GLUT (OpenGL Utility Toolkit) を用いて実装した。MR 空間生成のために、Osprey-440 から DirectShow を介して得たカメラ映像を背景として設定し、LIBERTY から受け取った位置姿勢情報を元に OpenGL 上で仮想カメラを設定する。その上で各種描画操作を行うことで、現実世界の光景と仮想物体の実時間合成を実現している。

仮想物体の形状は三角形メッシュ表現を用いて保持している。三角形メッシュは頂点、稜線、面の3要素で定義し、切断操作を効率よく行うために、各要素の接続関係を位相情報として保持している。また、仮想物体同士の接続関係を表現するために、シーングラフ構造を用いている。

【道具型デバイス】

本システムではピンセット型デバイス（図7）とナイフ／ハンマ型デバイスを用いる。各デバイスに内蔵された各種入力／提示機構の入出力制御は、デバイス制御用 I/O BOX を介して PC からシリアル通信で行う。

ピンセット型デバイスは、位置姿勢検出のための磁気センサのレシーバの他に、挟み幅取得のためのポテンションメータや反力提示のためのソレノイドなどを内蔵しており、これらを利用して挟み幅に応じた反力を提示することが可能である。また、スピーカや LED, 振動モータを内蔵しており、視・聴・触力覚に対して操作内容を確認するための情報を提示できる。

4.3. インタラクション

本システムは木材加工を指向した造型システムである。空間中には予め角材や板、丸太といった基本形状となる数種の仮想物体が用意されており、ユーザは必要に応じて任意の物体を選択し、各種デバイスを用いてこれを加工する。操作方法は、図8に示すように、ナイフ型デバイスを用いた仮想物体の切断、ピンセット型デバイスを用いた仮想物体の選択・移動、ハンマ型デバイスを用いた仮想物体同士の結合から構成される。ユーザはこれら切断、選択・移動、結合の操作を繰り返し行い、任意の形状を作成する。次に、それぞれの操作・実現方法に関して詳細を述べる。



図5 道具型デバイスを用いた木材加工システム (イメージ図)

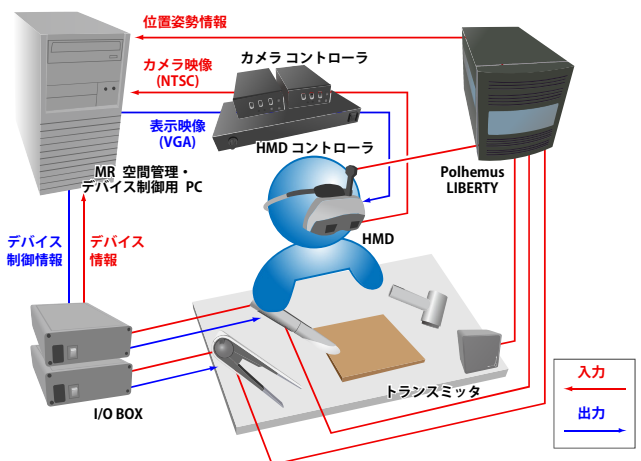


図6 システム構成



図7 ピンセット型デバイス

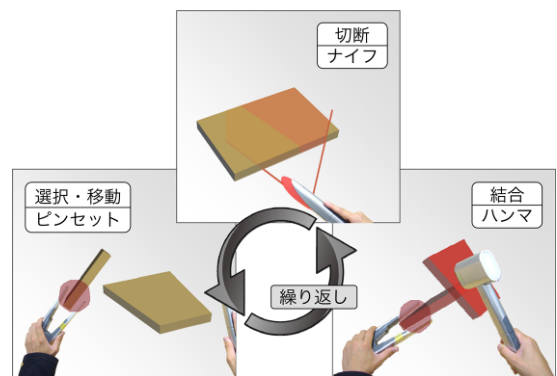


図8 木材加工ワークフロー

【選択・移動】

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。デバイスの先端にはガイドとなる仮想球が表示されており、仮想物体に近づけるとその色に変化し、その際にデバイスを挟み込むことで物体を選択することができる。選択時には、実際に物体を掴んだかのような反力が提示され、デバイス先端のLEDが点灯することで、正しく選択されたことを確認することができる。仮想物体の選択後はデバイス位置に追従して物体が移動するため、物体を挟んだまま移動することで物体を3次元空間の任意の場所へ移動することができる。また、デバイスを把持する力を緩め先端を開くことで、仮想物体を任意の位置で放して配置することができる。

【切断】

ナイフ型デバイスを卓上でスライドさせることで仮想物体の切断を行う。切断手順を図9に示す。まず、(1) デバイス先端部を卓上に押しつけ、(2) スライドさせることで、スライド開始位置と現在位置を結ぶ切断平面が表示され、操作確認のためLEDが点灯する。そして、(3) デバイスを卓上から離すことで、切断平面に沿って仮想物体を切断することができ、操作応答を示す効果音が再生される。なお、押しつけの検出にはデバイスに内蔵のタクトスイッチを用いている。

処理としては、デバイスをスライドする際に、デバイス先端部と接触した仮想物体を切断対象としてスタックし、デバイスを卓上から離した際に、実際に切断操作を行っている。切断操作では、各仮想物体に対し

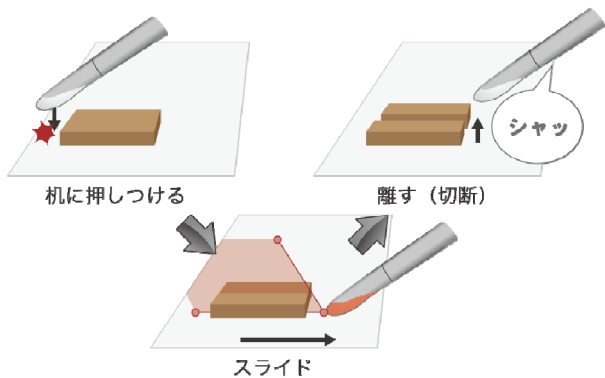
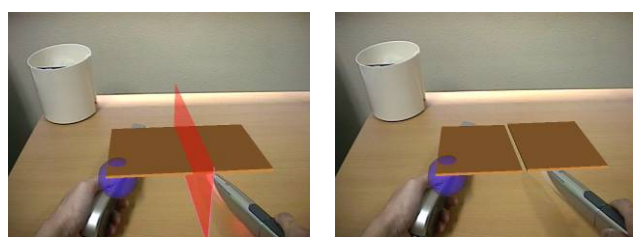


図9 切断手順



(a) 切断前 (b) 切断後

図10 操作風景・切断

切断平面と衝突する稜線上の交点を算出した後、交点同士をつなぎ合わせて切断面を作成し、最終的にシーングラフ上で仮想物体の分離を行っている。

実際に切断を行っている操作風景を図10に示す。

【結合】

ハンマ型デバイスを振り下ろすことで仮想物体同士の結合を行う。結合手順は図11のようになっており、まず、(1) ピンセット型デバイスを用いて仮想物体同士が重なるように配置し、(2) 配置された仮想物体に対してハンマを振り下ろすことでそれらを結合することができる。結合の際には、効果音の再生やデバイス本体の振動により操作に対する応答が示され、結合された仮想物体は結合結果を示すために一時的に赤く強調表示される。なお、振り下ろし動作の検出にはデバイスに内蔵の加速度センサを用いている。

処理としては、デバイスを振り下ろした際に、接触した仮想物体に関してバウンディングスフィアを作成し、それと接触している仮想物体を検出している。接触する仮想物体が検出されたとき、それをシーングラフ上でデバイスと接触した仮想物体の子ノードとして設定することで、仮想物体同士の結合を実現している。

実際に結合を行っている操作風景を図12に示す。

【削除】

削除にはテーブルの隅に設置された実物体のごみ箱を用いる。ピンセット型デバイスを用いて削除対象の仮想物体を掴み、ごみ箱まで移動させ、その上で放すことで削除することができる。また、削除の際には効果音が再生される。

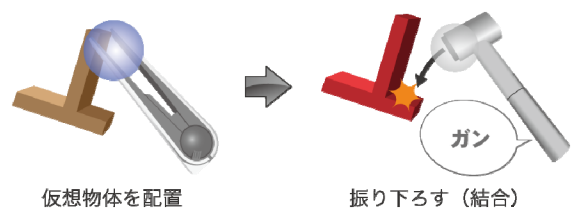
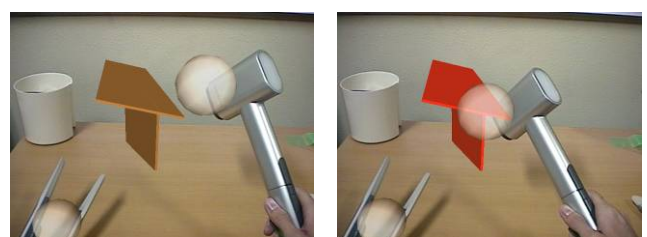


図11 結合手順



(a) 結合前 (b) 結合後

図12 操作風景・結合

4.4. 運用

本研究で試作したナイフ／ハンマ型デバイスおよび木材加工システムを数名の学生に体験させた。まず被験者は、実験者による簡単なデモンストレーションを通して操作を学び、続いて、実際にシステムを使いながら練習を行った。そして操作に慣れた後、自由に木材加工を行わせ、その後コメントを得た。

被験者の体験風景を図 13 に示す。体験の様子を観察したところ、被験者はデモンストレーション時の実験者の操作を見て、すぐに操作方法を理解した様子で、デバイスを手にすると迷うことなくそれぞれの操作を行い、デバイスを用途に応じて使い分けていた。このことから、選択・移動、切断、結合操作とピンセット、ナイフ、ハンマという道具のマッピングは妥当であること、目的に応じて複数のデバイスの中から適したデバイスを手に取り利用することが、自然に行われることを確認した。

体験終了後に得られたコメントでは、実世界の造型操作を取り入れた木材加工システムについて「道具を用いた操作は直観的で、新たな造型作業のアプローチとしておもしろい」「音や振動、LED の点灯による各種フィードバックは操作感を向上させている」などの好意的な意見が得られ、道具を用いた操作の直観性が示唆された。その一方で「実際にはデバイスが手前にあるのに、仮想物体が前面に描画されるので、奥行きが知覚しにくい」「仮想物体とデバイスが接触している際に、触れたという感覚に乏しい」「削ったり変形したりする道具も欲しい」といった今後の課題となる意見も得られた。

運用で作成された作品を図 14 に示す。

5. むすび

新たな道具型デバイスとして、複合現実空間における 3 次元物体への加工操作に適した「ナイフ／ハンマ型デバイス」を提案、実現し、それを用いた事例として、実世界の造型操作を取り入れた木材加工システムを試作した。試作したシステムを運用した結果、各デバイスを用いた操作が直観的で、それぞれの操作にマッピングされた道具についても妥当であること、デバイスの使い分けも自然に行われることを確認した。

今後は、今回の運用で指摘された問題点を解決するとともに、切る・叩く以外の加工操作についても検討し、必要となるデバイスを提案・開発することで、様々な造形作業の実現を行っていく予定である。

謝辞 本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業（さきがけタイプ）「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」による。

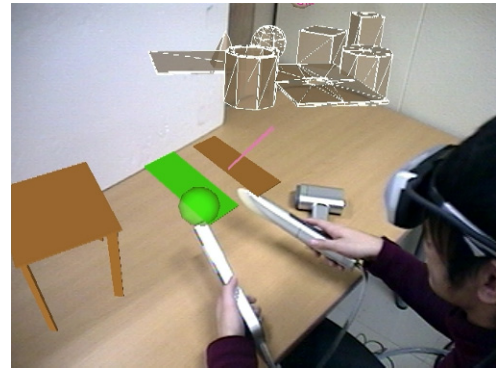


図 13 体験風景

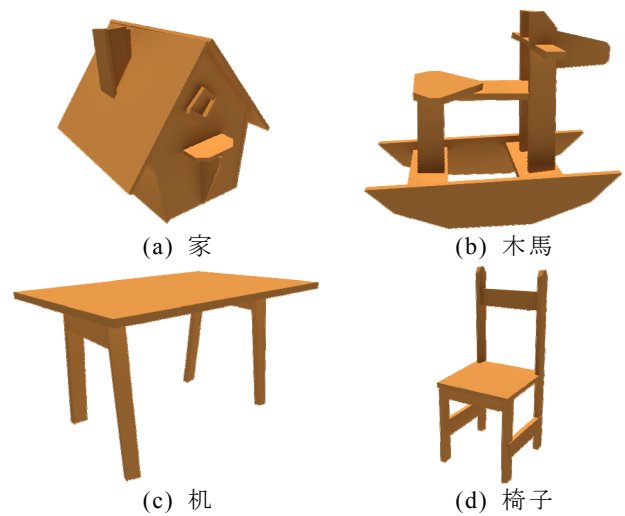


図 14 作品例

文 献

- [1] 上坂晃雅, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “複合現実空間との対話操作のための道具型デバイス”, 信学技報, Vol. 107, No. 427, PRMU2007-170, pp. 81 - 86, 2008.
- [2] G. Anagnostou, D. Dewey, and A. T. Petra: “Geometry-defining processors for engineering design and analysis,” The Visual Computer, Vol. 5, No. 5, pp. 304 - 315, 1999.
- [3] D. Anderson, J. L. Frankel, J. Marks, A. Agarwala, P. Beardsley, J. Hodgins, D. Leigh, K. Ryall, E. Sullivan, and J. S. Yedidia: “Tangible interaction + graphical interpretation: A new approach to 3D modeling,” Proc. SIGGRAPH 2000, pp. 393 - 402, 2000.
- [4] J. Sheng, R. Balakrishnan, and K. Singh: “An interface for virtual 3D sculpting via physical proxy,” Proc. GRAPHITE 2006, pp. 213 - 220, 2006.
- [5] G. Wesche and H.-P. Seidel: “FreeDrawer: A free-form sketching system on the responsive workbench,” Proc. VRST 2001, pp. 167 - 174, 2001.
- [6] 吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹: “コンセプトデザインのためのデジタルツール「空間スケッチシステム」の開発”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 6, No. 4, pp. 313 - 322, 2001.
- [7] S. Schkolne, M. Pruett, and P. Schröder: “Surface drawing: Creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools,” Proc. CHI 2001, pp. 261 - 268, 2001.