原著論文

Vol.14 No.2, 2012

複数の道具型デバイスを活用する複合現実型木材加工システム

髙見 雄介[*1*2]　木村 朝子[*1]　柴田史久[*1]　田村 秀行[*1]

A Mixed Reality Handcrafting System Using Multiple ToolDevices

Yusuke Takami[*1*2], Asako Kimura[*1], Fumihisa, Shibata[*1], and Hideyuki Tamura[*1]

Abstract - We have proposed novel interaction devices; ToolDevice, which is for various operations in large electric working space. They use metaphors 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. 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. We already had developed TweezersDevice for pick and move manipulations and BrushDevice for painting. In this paper, as a third device, we proposed and developed Knife/HammerDevice for handcrafting operations. Additionally, we constructed a handcrafting system as a usage example of the multiple ToolDevices including Knife/HammerDevice and TweezersDevice. The experiment of this system revealed the intuitiveness of each ToolDevice and their switching operation, but also the difficulty of precise positioning and cutting operation with them. To resolve these problems, we introduced constraints on movement of virtual objects and the devices to the system for assistance of these operations.

Keywords: ToolDevice, Knife, Hammer, Mixed Reality, Handcrafting System, Constraint on Movement

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) 技術の進歩は目覚ましく，新たな映像表現の世界を切り拓いている．写実的な映像を生成する CG 技術が研究されてきた一方で，3DCG のモデリングツールや CAD ツールが充実し，今やグラフィックデザイナや製品デザイナはコンピュータを駆使して製作することが一般化している．更に，3DCG モデリングツールの低価格化やフリーソフトの増加に伴い，プロのデザイナだけでなく，より多くの人々が 3DCG モデリングを楽しむようになってきた．

しかし，現状のモデリングソフトや CAD システムの多くは，高機能である半面，画面上に多くのメニューやボタンが並び，操作が複雑で覚えにくい．また，モデリングの際に複雑な位相操作や幾何操作を用いるため，事前学習なしに扱うことは難しい．更に，これらのソフトで標準的に用いられる三面図，マウス，キーボードの組み合わせも，十分使い慣れれば，見事な 3DCG を実現できる方法ではあっても，立体形状の把握や，加工操作が直観的ではない．そのため，直観的で，学習が容易なモデリング手段や入力方法を求める人も少なくない．

上記問題の解決に向けて様々な研究[1]~[8]が行われる中で，本研究では仮想物体を操作する道具側に着目し，

・実世界で使われている実体のある道具を対話デバイス（「道具型デバイス」）として導入
・モデリングの手段を，木材加工といった実世界の造型作業に近づける
・作業空間を複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間とすることにより，機能は制限されるものの学習や立体形状の把握が容易で，操作対象への直接操作が可能な，直観的な造形システムを実現する．

以下，本論文では，まず 2 章で道具型デバイスについてそのコンセプトを簡単に説明し，造形操作のための道具型デバイスとしてナイフ／ハンマ型デバイスの機能設計，実装を行う．次に 3 章で同デバイスを含む複数の道具型デバイスを活用する立体造型システムとして，複合現実型木材加工システムを提案するとともに，その設計，実装，運用結果について述べる．さらに 4 章では運用の結果明らかとなった問題を解決するために，木材加工システムに導入した補助機能について詳述する．

2. 関連研究

直観的で，学習が容易なモデリング手段や入力方法というニーズに対して，Igarashi らは平面上に手書き自由曲線を描いていくことで，3 次元モデルを対話的に構成する手法を提案している[1]．

一方，人工現実感 (Virtual Reality; VR) や MR 技術を応用し，新たな対話デバイスを用いることで直観的なモデリングの実現を試みる研究も行われている．Anagnostou ら[2]，Anderson ら[3]，清川ら[4]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．また，Sheng ら[5]は 3 次元形状の生成や操作に，変形可能な実物体を

*1: 立命館大学大学院理工学研究科
*2: 現在，ソニー株式会社
*1: Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.
*2: Sony Corp.

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 ディスプレイ上のモデルに反映することができる．この際，スポンジ状の対話デバイスをモデルに見立てて操作することで，フィードバックを伴った直観的な操作を実現している．これらの研究では，対話デバイスを仮想物体に置き換えて利用している点に特徴がある．積み木や粘土のメタファを利用し，組み立て，変形が可能な実物体の対話デバイスを導入することで，あたかも仮想物体に直接触れているかのような操作感を実現している．

これに対して，仮想物体を操作する道具側に着目し，道具を実体のある対話デバイスとして導入することで，立体造型作業の直観性を向上させようとする試みもある．Wesche ら[6]や吉田ら[7]はペン型のデバイスを用いて 3 次元形状を生成しており，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面を作成できる．Schkolne ら[8]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．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．

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形状，重さ，触感，操作音などを有する「道具型デバイス」を開発し，モデリングの手段を，木材加工といった実世界の造型作業により近づけることで，機能は制限されるものの学習の容易な，直観的なシステムを実現する．また，作業空間を MR 空間とすることで，立体形状の把握を容易にし，操作対象への直接操作を実現する．

3.　造形操作のための道具型デバイス

3.1　道具型デバイス

今日，多くの人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「道具型デバイス[9]」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．加えて，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，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．

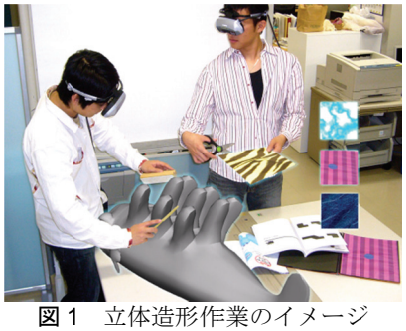


図 1　立体造形作業のイメージ
Fig.1　Image of 3D handcrafting operation

ただし，考えうる道具のすべてを実現すると対話デバイスの種類が膨大となる．そこで，見た目や手触りからその用途が分かり，かつできるだけ柔軟な操作が可能な「準汎用」のデバイスを目指す．例えば，ナイフ，ノコギリ，包丁は「切る」ための道具であり，同じ包丁の中でも切る対象や切り方などはそれぞれ異なる．しかし，我々の提唱する「道具型デバイス」では，これらすべてを対話デバイスとして用意するのではなく，

(i)　道具の外観から「切る」という機能をすぐに思いつく
(ii) 用途が特殊でない，一般的な道具である
(iii)「切る」以外の他の用途にあまり利用されない

という 3 つの条件を満たす道具を「切る」という機能にマッピングする．これにより，ユーザが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容易となる．

我々はこれまでに，2 次元ディスプレイとマウスが苦手とする，空間型作業に適した事例として，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型作業（図 1）などを想定し，それらを実現する操作として「選択・移動」「描画」「加工」の 3 種類に絞り込んだ．既に，これらの操作を実現する道具型デバイスとして，選択・移動用の道具型デバイスであるピンセット型デバイス[9]，描画用の筆型デバイス[10]を実現している．

3.2　造形作業に用いられる道具とその機能

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り様々であり，例えば素材が木材であれば，ノコギリやヤスリ，鉈や金槌，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，これらの道具を実現される加工操作で分類してみると，切る，叩く，削る，といった数種の操作に集



図 2　ナイフ／ハンマ型デバイス
Fig. 2　Knife/HammerDevice

約できる．本研究では，3.1 で述べたとおり，これら集約された加工操作に対し，それぞれに適した道具をマッピングし，道具型デバイスを実現する．本研究では，まず様々な加工操作を列挙した中で出現頻度の高かった「切る」「叩く」操作から着手する．

3.3　設計方針

「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，3.1 の (i) ～ (iii) の条件を踏まえ，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一般的な道具で，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かなりの数存在するため，それぞれの操作を単一のデバイスで実現するのではなく，電気掃除機のアタッチメントや電動ドリルのように先端部を着脱，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 1 つ実現し，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．

3.4　ナイフ／ハンマ型デバイスの実装

【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 2 ではナイフの着脱部が本体と接続されている．

着脱部の外観は，一般的な「ナイフ」「ハンマ」を容易

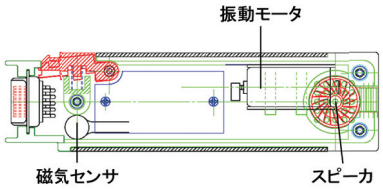


図 3　本体の内部機構
Fig. 3　Mechanism of common part

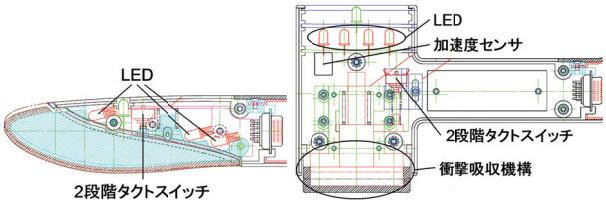


図 4　着脱部の内部機構
Fig. 4　Mechanism of detaching parts

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着脱部に錘を入れ，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．

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磁気センサのレシーバを内蔵．

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．

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．

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の先端部を押し込むことで，内蔵された 2 段階タクトスイッチが押



図 5　ピンセット型デバイス
Fig. 5　TweezersDevice

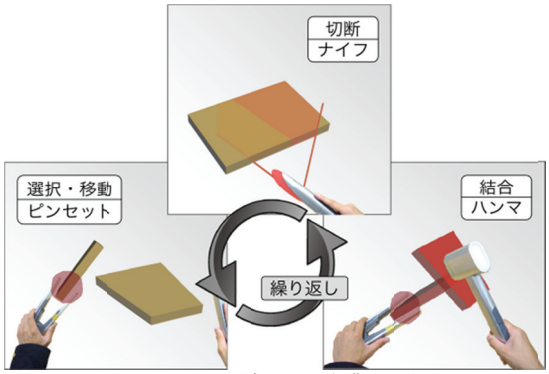


図 6　木材加工の作業手順
Fig. 6　Workflow of handcrafting

下され，その強さを 2 段階で検出可能．

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．カラーLED を内蔵．ナイフでは刃部，ハンマでは接触部の反対側がそれぞれ点灯．

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 3 軸加速度センサを内蔵．

4.　複合現実型木材加工システム

4.1　設計方針

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．造形方法ごとで作成できる造形物の特徴が異なるため，将来的には，それぞれの造形システムを用意し，切り替えることで，作成可能な 3DCG モデルの表現力向上が期待できる．本研究ではまず，その中でも多くの人にとって作成経験があり，作業内容が容易に想像できる，木材加工システムを構築する．

木材加工システムでは，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それぞれの加工操作を行う．これに加え，既に開発済みのピンセット型デバイス（**図 5**）を利用して物体の選択・移動を行う．作業手順としては実際の木材加工同様，予め用意された様々な大きさ・形状の木材に対し，ナイフ型デバイスを用いて切断操作を行い，必要な形状を切り出し，ピンセット型デバイスを用いて切断された

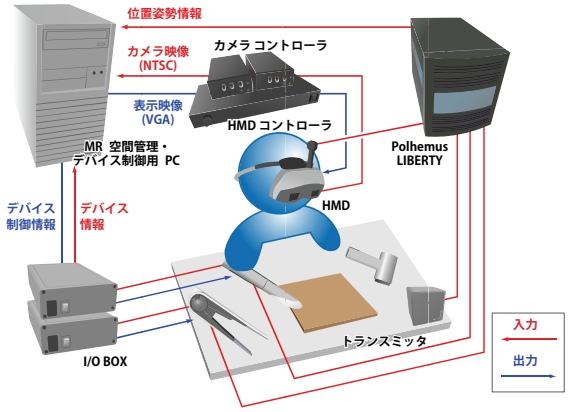


図 7　システム構成
Fig. 7　System configuration

形状を選択・移動し，それらを組み立て形作る．最後にハンマ型デバイスを用いて結合操作を行い，組み立てた形状がくずれないよう 1 つにまとめる．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（**図 6**）．

また木材加工作業をより現実に近づけるため，作業空間として MR 空間を採用する．VR 空間でなく，MR 空間を採用するのは，以下の理由による．

・操作を円滑にするためには VR 空間で CG 表現された仮想の手を見ながら操作を行うより MR 空間で利用者自身の手が視認できる方が好ましい
・複数人が相談・協調できるシステムへの発展を考えると同時に他の体験者を視認できる MR 表示が好ましい

具体的には，視覚ディスプレイとしてヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) を利用し，その眼前に現実世界と仮想世界とが融合した空間を視覚的に提示する．これによりユーザの手元と操作対象である仮想物体の存在する空間を一致させ，ユーザが HMD を通して自分の手や道具型デバイスとともに仮想物体を直接視認できるようにする．また，HMD の 3 次元位置を実時間で推定し，その結果に基づいて仮想世界の提示を行うことで，実世界のようにユーザが頭を動かして任意の視点から仮想物体を眺められるようにする．

4.2　システム構成

木工加工システムを実現するハードウェアの構成を**図 7** に示す．MR 空間管理・デバイス制御には Microsoft Windows XP OS，Intel Core i7 Ext 965 CPU，6144 MB RAM，NVIDIA GeForce GTX 280 ビデオカード搭載の PC を用い，MR 空間の映像提示には Canon VH-2002 ステレオビデオシースルーHMD を用いる．また HMD およびデバイスの位置姿勢推定には Polhemus 社製の磁気センサ LIBERTY を用いる．システムの開発には，C++/CLI 言語および.NET Framework を使用し，グラフィックス API に OpenGL，GLUT (OpenGL Utility Toolkit) を用いて実装した．

仮想物体の形状は三角形メッシュ表現を用いて保持す

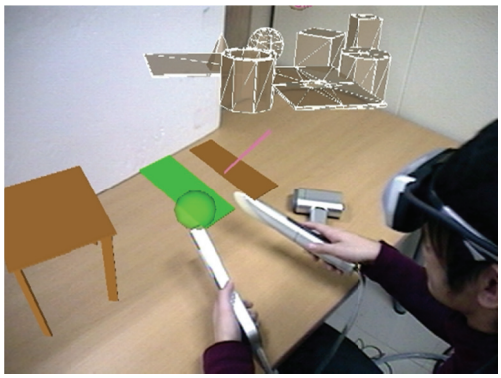


図 8　体験風景
Fig. 8　Example of experience

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する．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る．

ナイフ／ハンマ型デバイス，ピンセット型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．ただし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メータ，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できる．また，スピーカや LED，振動モータを内蔵しており，視覚，聴覚，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

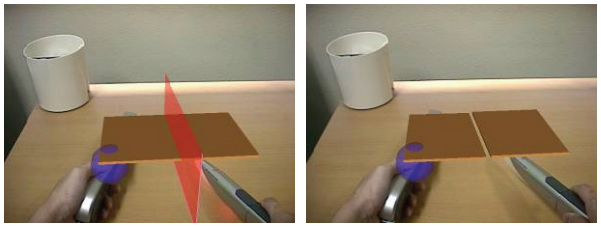
試作した木材加工システムの体験風景を図 8 に示す．本システムでは，ピンセット型デバイス，ナイフ／ハンマ型デバイス，ごみ箱（実物），体験者の右手前方に配置された様々な基本物体（仮想物体）を利用し，以下の 4 つの機能を実現している．

【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を選択し，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．そして，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姿勢で放して配置することができる．

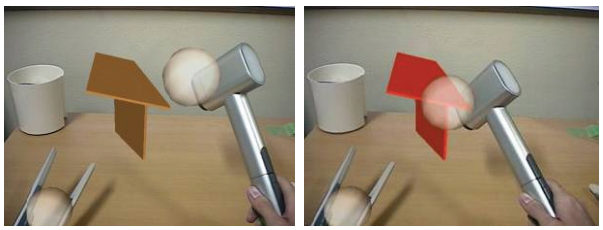
操作中，仮想物体を選択すると，ソレノイドによるブレーキ機構を利用して実際に物体を掴んだかのような反力を提示し，LED を点灯させることで，正しく選択されたことを提示する．

体験者は，右手前方にある様々な基本物体の中から，ピンセットを使って任意の形状の仮想物体を選択することができる．体験者から見て後方に配置された基本物体が選択しにくくならないよう，すべての基本物体は右手前方で円を描くように（メリーゴーラウンドのように）ゆっくりと旋回している．



(a) 切断前　　(b) 切断後

図 9　ナイフ型デバイスによる切断
Fig. 9　Cutting operation using KnifeDevice



(a) 結合前　　(b) 結合後

図 10　ハンマ型デバイスによる結合
Fig. 10　Joining operation using HammerDevice

【切断】

ナイフ型デバイスの刃部分の接触判定機構を利用し，刃部分を卓上に押し付けスライドさせることで仮想物体の切断を行う．まず，(1) デバイス先端部を卓上に押しつけ，(2) スライドすることで，切断平面が表示される．そして，(3) デバイスを卓上から離すことで，切断面に沿って物体を切断できる（図 9）．

操作中は，仮想物体に接触した際に，振動モータを利用して衝突感を提示する他，切断状態を表すために LED を赤く点灯させる．また，スライド時には，切断面（押しつけた際のデバイス位置，現在のデバイス位置，現在のデバイスの頭頂点の位置を結ぶ面）を表示する．そして，切断時には，操作応答を示す効果音を再生する他，分割された物体を，切断面を基準として互いに離れるよう移動させる．

【結合】

ハンマ型デバイスの加速度検出機構を利用し，デバイスを振り下ろすことで仮想物体の結合を行う．まず，(1) ピンセット型デバイスを用いて物体同士が触れるように配置し，(2) それにハンマを振り下ろすことで結合できる（図 10）．

操作中は，結合の際に振動モータを利用して衝突感を提示する他，操作応答を示す効果音を再生する．また，結合結果を示すために物体を一時的に赤く強調表示する．

【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利用する．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，ごみ箱の上で放すことで削除される．削除の際には効果音が再生される．

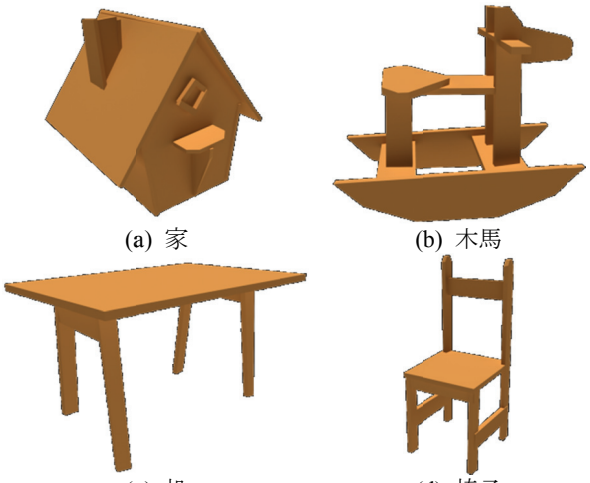


図 11　作品例
Fig. 11　Modeling results using our system

4.4　運用

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の直観性，学習容易性，機能と道具のマッピングの妥当性を確認するために 6 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．体験中は質問を受け付けず，被験者が困っているときのみ，実験者が助言を行った．デモンストレーションでは，実験者がピンセットによる選択・移動・削除，ナイフによる切断，ハンマによる結合操作を 1 分程度行った．デモンストレーション中，被験者には，側に配置された液晶ディスプレイを通して，実験者が装着している HMD の片目映像を提示した．また，練習は被験者が満足するまで行わせた．そして操作に慣れた後，時間を区切ることなく自由に木材加工を行わせ，その後コメントを得た．

作成された作品を図 11 に示す．まず，各被験者の練習時間は概ね 5〜10 分程度であった．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，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．ただし，ナイフ型デバイスは，空中で操作できる他のデバイスと異なり，ナイフを卓上に押し付けなければ切断できないため，練習の際，半数の被験者が空中で切断しようとして切断できずに戸惑った．よって卓上で押し付けたときのみ切断できる旨，助言を行った．以上のことから，ナイフ型デバイスによるインタラクション方法にまだ改善の余地はあるものの，選択・移動，切断，結合操作とピンセット，ナイフ，ハンマという機能と道具のマッピングについては問題がなかったこと，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することができた．

体験終了後に得られたコメントでは，実世界を模した木材加工システムに対して「道具を用いた操作は直観的でおもしろい」「音や振動，光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や楽しさが示唆された．その一方で「仮想物体同士が交差してしまうため，正確に配置を行うことが難しい」「目分量で切断を行うため，木材を決まった長さでの切り出しや板面と切り口が直角になるように切断することが難しい」といった，正確に形状を作成する上での問題を指摘する声が多かった．その他，「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」といったオクルージョン問題，「ナイフ型デバイスが仮想物体と接触している際に，触れたという感覚に乏しい」といった触力覚提示機構に関する要望が聞かれた．このナイフ型デバイスにおける触力覚提示機構が実現され，空中に配置された仮想物体とナイフ型デバイスの接触，切断時に適切なフィードバックが提示されれば，空中での切断が可能となり，前述の切断の際卓上に押し付ける必要があるという問題も解決できると考えられる．また「削ったり変形したりする道具も欲しい」といった，新たな加工用道具型デバイスを期待する声もあった．

また同システムは，HIS2009（於東京）と SIGGRAPH Asia 2009（於横浜）において技術展示を行い，合計 100 人以上が体験した．この技術展示においても，上記運用結果と同様の観察結果およびコメントが得られた．

5.　動作拘束の付与

5.1　問題点の整理

運用の結果いくつかの問題が指摘されたが，ここではもっとも要望の高かった，正確な配置，切断に関する問題に着目する．では，実世界の木材加工を模した本システムで，これらを実現するには，どのような機能を追加するのが適切だろうか．

我々が日頃手にする物体の動きには様々な物理法則が作用しており，我々は日常の経験からこれらの効果を理解し，自然に利用して物体の操作を行っている．例えば木材を卓上に配置する際は，木材に加わる重力や木材と机が衝突した際の反力などを利用している．木材を直線で切断する際もまた，切削工具をあて木に沿って動かすなど，あて木からの反力を利用している．つまり，実世界では操作物体とその他の物体の位置関係に応じて物体の動きに様々な拘束があり，それを利用して我々は効率的に物体の操作を行っている．

そこで本システムでも，正確な配置，切断操作を支援するための機能として，仮想物体と補助道具という 2 つの動作拘束を導入する．ただし，大まかな加工操作と精密な加工操作が併用できるよう，これらの機能を必要に

応じて ON/OFF できるようにする．

5.2　2 つの動作拘束

(1) 仮想物体の動作拘束

物体同士を密着して配置する場合を考えると，実世界では物体を押し付ける際に反力が働き，それを利用して容易に配置することができる．しかし，仮想世界では，このような物理現象を意図的に発生させない限り，物体同士が干渉し並べて配置することが困難となる．

このような問題に対して，北村らは物体間の状態遷移を表すメタファとして擬似的な磁石を取り入れている[11]．物体同士を近づけた際に，あたかも面に貼られた磁石が引き寄せられるように操作物体の位置姿勢を制御し，もう一方の物体に密着するよう配置支援を行う．また，密着した面の数に応じて，1 面であれば 3 自由度（机の上の並進 2 自由度と回転 1 自由度），2 面であれば 1 自由度（両接触面に平行な方向の並進）というように動作の自由度を制限することで配置作業の精度と効率を向上させている．

この手法では物体を構成する面同士のなす角や距離などから，物体の移動に応じて動的に拘束面のペアを算出し配置支援を行っている．また，面同士の拘束を前提としているため，効果的に支援を行うためにはなめらかな曲面を有する形状ではなく少ない平坦な面で構成された形状が望ましい．その点，本システムで想定する木材加工では曲面でなく角張った面の形状を扱うことが多いため，本手法を用いる対象として適していると考えられる．そこで本研究では，北村らの手法を取り入れることで操作の支援を試みる．

(2) 補助道具の動作拘束

木材加工では板面と切り口が直角になるように切断操作を行うことが多いが，あらかじめ計測しておきガイドとなる線を引く必要があるなど手間がかかる他，正確な精度でこれを行うのは容易ではない．この問題に対し，実世界では治具と呼ばれる補助道具が用いられる．

治具とは工作物を固定し，切削工具を制御・案内する補助道具の総称であり，数多くの種類が存在する．中でもマイターボックスと呼ばれる治具は，正確な角度でノコギリを合わせて木材を切断する際に用いられ，3 面で構成される箱状の構造をしており，側面にスリットが入っている（**図 12**）．マイターボックスの役割は，大きく，配置支援，切断支援，計測支援の 3 つに分けられる．配置支援は，マイターボックス内側の側面に沿って木材を配置する作業や，配置した後に側面に沿って動かす作業を支援する機能である．また切断支援は，配置支援によって治具側面に沿って配置された木材に対し，ノコギリをスリットに合わせて引くことによってノコギリの動きがスリット方向に制限され，側面に垂直な方向や特定の角度方向に，正確に切断操作を行うことができる機能である．そして計測支援は，木材を任意の大きさに切断する際に木材の端やスリットを基準として長さを測る機能である．

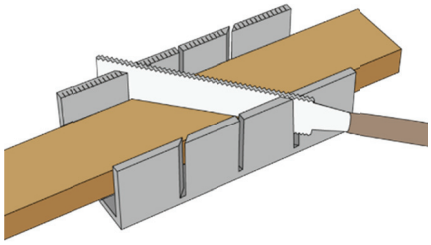


図 12　マイターボックス
Fig. 12　Mitre box



図 13　試作した治具
Fig. 13　Prototype jig

道具は単体で利用できるのに対して，補助道具である治具は道具を補助するために道具とセットで使うという関係にある．本研究では木材加工操作を支援する補助道具としてマイターボックス（実物体）を導入し，それを用いたインタラクションとしてこれら 3 つの支援機能を実装することで仮想物体の切断，配置支援を試みる．

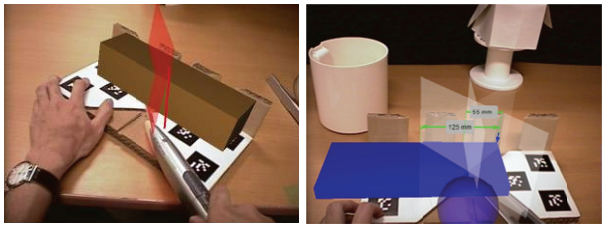
5.3　動作拘束の実現

(1) 仮想物体の動作拘束

仮想物体の動作拘束に関しては北村らの手法[11]をもとに実装を行った．ピンセット型デバイスで物体を挟んだ状態で他の静止物体（仮想物体，治具，卓上面）に近づけることで，動作拘束により物体同士の面間で密着配置が実現される．北村らの手法と同様，拘束後は密着した面の数に応じて動作の自由度が制限される．またピンセット型デバイスで密着している物体の一方を把持し，一定距離（接触している面積に応じて決定される）以上引っ張ることで，物体同士を外すことができる．

(2) 補助道具の動作拘束

マイターボックスを模した治具を試作した（**図 13**）．本来のマイターボックスはコの字型の形状で，木材の大きさに応じて専用の治具を用いるが，今回は 1 つの治具で様々な大きさの仮想物体に対応できるよう，側面の一方を取り払ったＬ字型のデザインとした．大きさは一般的な 2×4 木材用途のマイターボックスに倣い，底面 300×140 mm，高さ 80 mm とした．側面には 3 つのスリット（左右 45 度，90 度）を設け，底面にもガイド用の溝を設けた．これらの幅はナイフ型デバイスがスライドできるよう，ナイフ型デバイスの厚さ 26 mm，刃先の厚さ 6 mm を考慮し，スリット幅 30 mm，溝幅 8 mm とした．治



(a) 切断支援　　(b) 計測支援

図 14　治具を利用した操作
Fig. 14　Interactions using the jig

具を仮想物体として実現する方法も考えられるが，実物体の治具に物理的な淵や溝を設けることで，そこにナイフ型デバイスをあて，すべらせて操作することができ，触感の点でよいガイドとなる．

また，仮想物体を治具に配置する際に位置ズレが生じないように，磁気式の位置姿勢センサに加え，ビジョンベースによる位置合わせ手法である ARToolKitPlus[12]を導入した．治具に貼り付けられたマーカを HMD のカメラで検出することにより，その間の相対的な位置姿勢を算出し，磁気センサから得られる HMD の位置姿勢と合わせて，センサ座標系における治具の位置姿勢を求める．

5.4　治具を用いたインタラクション

配置支援：ピンセット型デバイスで物体を挟み，物体の面が治具と接するよう近づけることで，物理拘束が発生し治具に密着配置することができる．治具の角に合わせて物体を配置（治具に対し 2 面拘束）することで，物体が並進 1 自由度に動作拘束され，物体の移動が離散的に変更される．これにより，ピンセット型デバイスで物体を掴んでいる位置に近い端点を基準として，5 mm 単位で移動させることができる．また仮想物体は，一旦治具に配置されると，その位置関係を保ったまま実物の治具の動きに追従する．

切断支援：治具のスリットにあわせてナイフ型デバイスを奥から手前に向けスライドさせることでスリットに沿った正確な切断を行うことができる．視覚的な補助として，スリットを跨いだ状態で物体を治具に配置すると，そのスリットに沿って切断した場合の切断面が白色半透明で表示される．複数のスリットを跨いだ場合は，複数の切断面が表示され，ナイフ型デバイスを特定のスリットに近づけると，そのスリットの切断面の色が白から緑に，切断を開始すると緑から赤色に変化する（図 14 (a)）．

計測支援：治具の角に合わせて配置された物体をピンセットで把持すると，各スリットと物体の両端を結ぶ長さが計測される．計測結果は「計測部分を示す矢印」と「長さを示すテキスト情報（mm 単位）」を用いて，物体上部に治具の側面に沿って表示される（図 14 (b)）．

5.5　ユーザスタディ

【方法】

木材加工システムを利用する上で，仮想物体や道具に

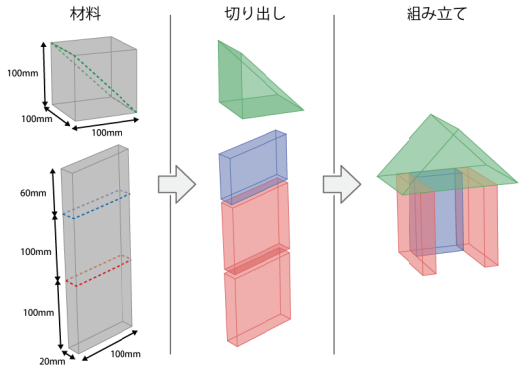


図 15　被験者に提示した作業手順
Fig. 15　Task process shown to the subjects

動作拘束を設ける操作補助が有効に作用するか確認するために，5.3 で述べた 2 種類の動作拘束を ON にした状態で運用を行った．被験者は木材加工システム（動作拘束なし）を体験したことのある成人 4 名とした．

まず被験者は，実験者から簡単なデモンストレーションを通して動作拘束の利用方法を学び，続いて，実際にシステムを使いながら操作の練習を行った．デモンストレーションでは，まず実験者がピンセットで複数の仮想物体を実際に移動し，仮想物体間の動作拘束，机や治具と仮想物体間の動作拘束を示した．次に治具を利用した 90 度，45 度での仮想物体の切断，計測支援機能を利用した任意長さでの切断，治具の角を利用した複数仮想物体の配置・結合といった操作を 1 分半程度行った．デモンストレーション中，被験者には，側に配置された液晶ディスプレイを通して，実験者が装着している HMD の片目映像を提示した．

操作に慣れた後，動作拘束を利用し指定した形状を作成する課題を行わせた．指定形状を作成する課題を行う際は，予め被験者に図 15 に示される作業手順の記された用紙を渡し，随時これを確認しながら作業を行うよう伝えた．この課題作品を正確に作成するためには「指定した長さでの切断」「端点を基準とした斜め 45 度での切断」「物体同士を密着させ端をそろえた配置」などの動作拘束が必要となるため，作品の完成度を確認することで被験者が動作拘束を適切に利用することができたか判断することができる．

いずれの作業も特に時間制限は設けず，また実験者への質問も自由とした．作業終了後に，本システムについてのコメントを得た．

【結果と考察】

各被験者の練習時間は 10 分程度，課題の達成時間は 4～10 分程度であった．体験の様子を観察したところ，被験者は仮想物体同士を近づけた際の磁石を模した動作拘束に最初は戸惑いを見せたものの，すぐに挙動を理解した様子で，拘束の効果を利用して配置を行っていた．また治具に関しても同様に，動作拘束の効果によって自然

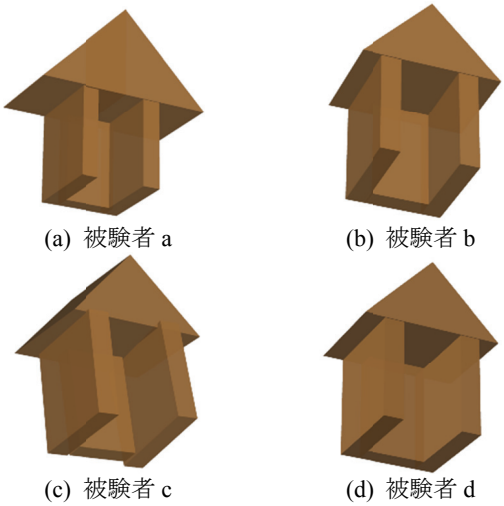


図 16　作業結果
Fig. 16　Task results

に物体を治具へ設置し，スリットにナイフ型デバイスを通し，溝に沿ってスライドさせることで切断を行っていた．形状作成の作業では，全ての被験者は，計測機能を用いてスリットから指定の長さ位置に物体を配置し，正確な長さ，角度で材料の切り出しを行っていた．3 人の被験者は，現実で行うように治具の角を利用し，効率的に材木の端をそろえ正確な配置作業を行っていたが，1 名は，角を利用せず，材料同士の拘束のみを利用して空中で配置作業を行っていた．作業結果を図 16 に示す．被験者 c のみ角を利用せずに配置を行ったため，一部揃っていない部分が目立ったが，その他は概ね正確に指示通りの形状が作成されていた．これらのことから，仮想物体や道具に動作拘束を設ける動作拘束によって，問題となっていた物体同士の密着配置や，任意寸法での物体の切り出しといった操作が容易に実現できること，それらが形状作成の過程で自然に，適切に利用されていることを確認した．

体験終了後に得られたコメントでは，仮想物体の動作拘束について「近づけた際に磁石のように密着することや，密着後の動作拘束によって配置作業が以前のシステムよりも容易になった」「物体同士がぴたりと揃うのは操作していて気持ちがいい」，道具の動作拘束について「実物体として治具があることで直観的に切断できる」「治具が自由に動かせるのが便利」などの好意的な意見が得られ，動作拘束による操作補助の有効性が示唆された．その一方で，仮想物体の動作拘束について「意図した面と異なる面で拘束されてしまうことがある」，道具の動作拘束について「治具に配置した物体がずれて表示されることがある」「ナイフ型デバイスをスリットに沿って動かした際に，異なるスリットに沿って切断されることがある」などの問題が指摘された．ただし，これらの問題は HMD および各種デバイスの位置姿勢検出精度に起因するものであり，精度が向上すれば解決されると考えられる．

また今回は，配置支援，90 度，45 度の切断支援，計測支援という必要最低限の基本機能を備えた治具を実装したが，実世界では，用途ごとに治具を準備することも多く，例えば 30 度，60 度の切断支援が行える治具，より大きな対象を切断するための治具など，用途に応じて治具を準備することも十分考えられる．

6.　むすび

本論文では，3DCG のモデリング作業を，木材加工といった実世界の造型作業に近づけることで，学習が容易で，直観的なモデリングシステムを実現するシステムを提案した．実世界の造型作業で用いられる道具に近い形状，重さ，触感，操作音などを有する「道具型デバイス」を各種利用するとともに，作業空間として MR 空間を利用することで，操作する場所と視認する場所を一致させ，実世界と同様に手元を見ながらの操作を実現した．

我々はまず，このモデリングシステムで利用する加工操作用の道具型デバイスとして，ナイフ／ハンマ型デバイスを提案・実現した．そして，これらのデバイスと既開発のピンセット型デバイスを利用する MR 型木材加工システムを試作した．試作した木材加工システムを運用した結果，各デバイスを用いた操作は直観的で，学習が容易であり，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．一方で仮想物体の正確な配置，切断が難しいという問題も指摘された．

そこで，これらの問題を解決すべく，仮想物体，道具の 2 つの視点から磁石の挙動，治具を利用した動作拘束を導入した．その結果，多くの被験者が動作拘束を利用して正確な形状を作成でき，実世界の木材加工で行うような物体同士の密着配置や，任意寸法での物体の切り出しといった操作が容易に実現できていること，またそれらの動作拘束が自然に利用されていることを確認した．

今後は，空中に配置された仮想物体とナイフ型デバイスが接触し切断した時に，適切なフィードバックを提示可能な触力覚提示機構を検討するとともに，木材加工だけでなく，クレイモデリング，金属加工や石材加工など造形方法を切り替えることで，多様な 3DCG モデルを作成できるシステムを目指す．

参考文献

[1] Igarashi, T., Matsuoka, S., and Tanaka, H.,: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design; *Proc. SIGGRAPH '99*, pp.409 - 416 (1999).
[2] Anagnostou, G., Dewey, D., and Petra, A. T.: Geometry-defining processors for engineering design and analysis; *The Visual Computer*, Vol. 5, No. 5, pp. 304 - 315 (1999).
[3] Anderson, D., Frankel, J. L., Marks, J., Agarwala, A., Beardsley, P., Hodgins, J., Leigh, D., Ryall, K., Sullivan, E., and Yedidia, J. S.: Tangible interaction + graphical interpretation: A new approach to 3D modeling; *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 393 - 402 (2000).
[4] 清川清，竹村治雄，片山喜章，岩佐英彦，横矢直和：両手

操作を用いた仮想物体モデラ VLEGO；電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-A, No. 9, pp. 1517 - 1526 (1997).
[5] Sheng, J., Balakrishnan, R., and Singh, K.: An interface for virtual 3D sculpting via physical proxy; *Proc. GRAPHITE 2006*, pp. 213 - 220 (2006).
[6] Wesche, G., and Seidel, H. P.: FreeDrawer: A free-form sketching system on the responsive workbench; *Proc. VRST 2001*, pp. 167 - 174 (2001).
[7] 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；日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 6, No. 4, pp. 313 - 322 (2001).
[8] Schkolne, S., Pruett, M., and Schröder, P.: Surface drawing: Creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools; Proc. CHI 2001, pp. 261 - 268 (2001).
[9] 木村朝子，上坂晃雅，柴田史久，田村秀行：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，情報処理学会論文誌；Vol. 51, No. 2, pp. 314 - 323 (2010).
[10] 大槻麻衣，杉原賢次，中嶋友美，木村朝子，柴田史久，田村秀行：絵筆の描き味を活かした複合現実型描画システムと筆型対話デバイス；日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 15, No. 3, pp. 357 - 367 (2010).
[11] 北村喜文，エイミー・イー，岸野文郎：面間の動的拘束を用いた仮想物体の操作補助法；電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-A, No.2, pp. 506 - 517 (1996).
[12] Wagner, D., and Schmalstieg, D.: ARToolKitPlus for pose tracking on mobile devices; *Proc. CVWW 07*, pp. 139 - 146 (2007).

（2011 年 5 月 10 日受付，12 月 16 日再受付）

［著者紹介］

高見 雄介



2009 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒．2011 年同 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．2009 年より 2011 年まで道具型対話デバイスによる複合現実型木材加工システムの研究開発に従事．ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 優秀プレゼンテーション賞受賞．

木村 朝子（正会員）



1996 年大阪大学基礎工学部卒．1998 年同 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 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授，2012 年同教授．博士（工学）．実世界指向インタフェース，複合現実感，タンジブルユーザインタフェースの研究に従事．電子情報通信学会，情報処理学会，VR 学会，ACM，IEEE 各会員．VR 学会学術奨励賞・論文賞，情報処理学会山下記念研究賞等受賞．

柴田 史久



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．VR 学会複合現実感研究委員会委員．IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会，情報処理学会等の会員．VR 学会学術奨励賞・論文賞を受賞．

田村 秀行



1970 年京都大学工学部電気工学科卒．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．1997 年より 2001 年まで，MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた．VR 学会元理事，現在，評議員，複合現実感研究委員会顧問．編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」（オーム社）など．電子情報通信学会フェロー，IEEE，ACM，情報処理学会，人工知能学会，映像情報メディア学会等の会員．VR 学会及び情報処理学会論文賞，人工知能学会功労賞等を受賞．

(C) NPO法人ヒューマンインタフェース学会