応用論文

3D 空間における仮想オブジェクトの分解・観察に適した操作法の提案と実装

大槻麻衣，大下勉，木村朝子，柴田史久，田村秀行

Design and Implementation of a Novel Method Suitable to Separation and Observation of Virtual Objects in 3D Space

Mai Otsuki, Tsutomu Oshita, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

Abstract – In this research, we consider the manipulation of 3D virtual objects consisting of many parts in mixed reality space. We propose a method in which users can pick up only one part of an object they need and observe the relative positions of the parts and the connections between them from various directions. Our method uses metaphors in the real world. User studies showed that our approach helps users to avoid incorrect operations and improves the operational feeling and responsiveness. This paper presents the details of our proposed method and a system that can realize it using gestural inputs.
Keywords: Mixed Reality, Separation and observation, Gesture, Physics, Sound feedback.

1. はじめに

人工現実感（Virtual Reality; VR）なる概念が提案され，社会現象とも呼べるブームを巻き起こしてから 20 余年が経ち，その発展形である複合現実感（Mixed Reality; MR）の研究開発が本格化してからも 10 数年が経過した．当初巷間で喧伝されたような，現実と区別できないような仮想空間を体験できるには至ってはいないが，電子的に表現された仮想オブジェクトを実時間対話型で操作する技術は着実に進歩し，日常生活の至るところにその影響が及んでいる．工業製品の設計・製造やビデオゲームは言うに及ばず，Web ページや携帯電話の画面にも 3D-CG で表現されたオブジェクトが提示され，それを直接操作して，直ちに応答が得られることが当たり前のようになっている．

一方，電子化された 3D 空間内を視点移動したり，空間中の 3D オブジェクトを立体視する体験は多々あるが，そのオブジェクトの位置を正確に指し示したり，複雑な物体を分解・組立てできる対話技術は進歩していない．「3 次元マウス」なるデバイスが登場したこともあったが，2D 平面上での対話操作に比べて，3D 空間中のオブジェクト操作は円滑でなく，表現技術・表示機器の発展に比べて，3D 空間操作技術にはあまり大きな改善がなかったと言える．

立命館大学
Ritsumeikan Univ.

これは，3 次元座標系での位置決定精度が問題であるだけでなく，人間の両眼立体視では奥行き情報を正確に把握できないため，煩雑な 3D オブジェクトの操作にはぎこちなさが残るという問題がある．この本質的問題には，万能の解決法を見つけ難い状況にある．我々は，この問題を正面から解決することは避け，むしろ「奥行き知覚」に頼らずに，3D オブジェクトの操作が円滑に行える方法を考案・実装し，問題解決を図る方法を採用した．

本研究で我々が提案するのは，多数のパーツから構成される仮想の 3D オブジェクトを，まずは大まかなグループ単位で分解して手元に表示し，その内部や個々のパーツを（立体映像として）至近距離でじっくりと観察できるという手法で，快い操作感が得られるユーザ・インタフェースの実現である．対象は，CAD システムで設計された工業製品や建築物，多数の臓器が入り組んだ人体モデル等々で，複数のパーツが階層構造をなし，パーツ間は緩やかな接続・接着関係を保っていて，それを容易に分離・分解できるものとした．操作の快適さの実現のために，接続・接着状態に 3 種類のメタファを導入し，そのそれぞれの分離・分解動作の CG 表現に物理モデルを導入したレンダリングを採用し，見た目での円滑さ，少し誇張した自然らしさを追求することにした．

本論文では，本提案手法の基本概念から述べ，それを具現化するメタファとその物理計算モデル，ユーザ・インタフェースとしての実現に関して述べ，

実運用から得た知見や今後の発展させるべき方向性に関しても論じる．

2. 提案手法と関連研究

2.1 提案手法の概念と想定作業

本研究では，ユーザは両眼立体視が可能なシステムにおいて，多段階でグループ化された，複雑な構造を持つ仮想の 3D オブジェクトを MR 空間内で分解・観察する作業を想定する．すなわち，オブジェクト全体から「複数のパーツで構成されるある一部分」のみを取り出し，手元で移動・回転・拡大／縮小を行いながら，パーツ同士の位置関係や繋がりを様々な位置･方向から観察するという作業に特化し，これを円滑にするための手法を実現する．

個々のパーツを別々に扱うのではなく，適宜グループ化やその解除操作を行うことは，図形生成ソフト，幾何形状モデラ，プレゼンテーション・ツールなどでよく用いられていることであり，その流儀を踏襲する．このため，グループ化や接続関係の設定は本分解・観察作業のために事前に定義，実行しておくべきものであり，必ずしも CAD システムで設計された接続関係とは同じである必要はない．

以下に，想定する操作例を示す（**図 1**）．

(i) ユーザは観察したいパーツを「つまむ」ジェスチャによって選択する

(ii) 選択した状態で引き寄せると，予め定められたグループに応じ，部分的にグループ化が解除され，分解することができる

(iii) ユーザは，分解されたパーツ群を移動・回転・拡大／縮小しながら，パーツ同士の位置関係やつながりを様々な位置・方向から観察する

(iv) このパーツ群のより詳細を観察したい場合はさらにグループ化を解除し，細分化する

本研究では，手順 (ii)(iv) のグループ化を解除する際に，パーツ間の接続・接着のモデルとして，2.3 節に示す「磁石」や「接着剤」などの実世界のメタファをいくつか採用する．そのメタファにとって自然な視覚的効果を与えることで，この分解作業の誤操作を回避し，操作の快適性･応答性を向上させる．

VR 空間でなく，MR 空間を採用するのは，以下の理由による．

(a) 分解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．

(b) 複数人が相談・協調して 3D オブジェクトの分解・観察操作を実行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．

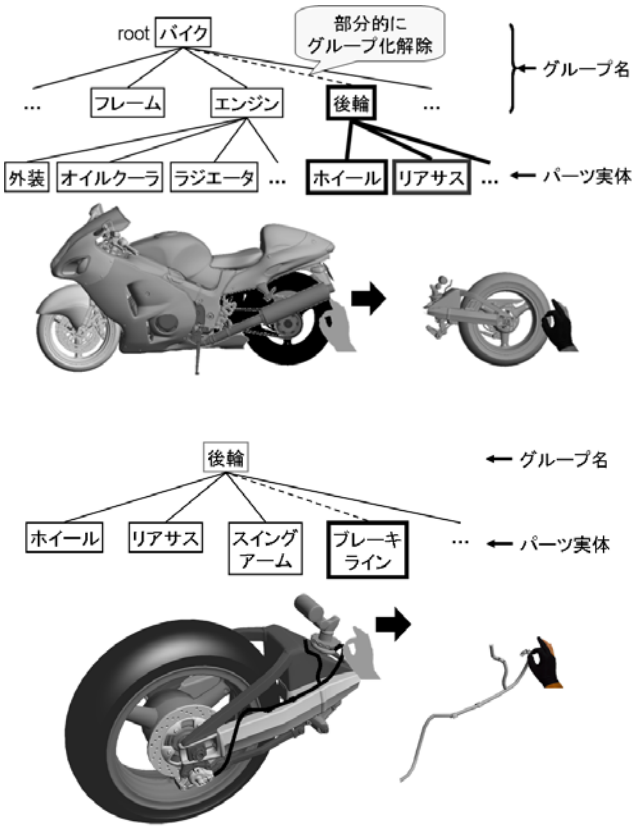


図 1　多段階でグループ化された仮想 3D オブジェクトの分解・観察操作の例

Figure 1: Example of our system's operation. User can detach and observe virtual 3D objects grouped in a multi-level hierarchy.

(c) 操作対象は CG 表現されたオブジェクトやそのパーツだけであっても，その大きさを実感するには他に比較できる実物体が存在する MR 表示の方が好ましい．

2.2 関連研究

Poupyrev らの Go-Go [1] では，ユーザは実世界の手の動きによって手形状のカーソルを操作し，仮想物体の選択を行う．Bowman らのレイキャスティング法 [2] では，仮想の光線を用いてオブジェクトを指し示し，選択を行う．しかしこれらの方法は，3D 空間中に多数のオブジェクトが存在し，ユーザ視点から重なり合って見える場合には，簡単に適用できない．その解決方法として，Grossman ら [3] や Olwel ら [4] の方法のように，光線を折り曲げて再集光する，といった工夫があるが，いずれの場合も奥行き知覚に関する問題を解決することは難しく，正確なポインティングは困難な課題であるため，本研究で想定する分解・観察操作には適さない．

また，複雑な構造を持つオブジェクトの分解・観察操作のための手法としては覗き窓を作る Cutaway [5] や目的のパーツが見えるよう表面を透過させて内部を表示する X-Ray [6] といった手法

が提案されている．しかし，これらの手法では目的のパーツは見えるが，他のパーツとの関係（例：周囲にどのようなパーツがどの程度離れて配置されているのかなど）を把握するのは困難である．また，構造を把握するために個々のパーツを展開して表示する Explosion diagram を用いる手法 [7-9] も提案されているが，人の感覚に訴えかけるフィードバックについてはあまり検討されていない．

Song ら[10] や Wilson ら [11, 12] は拡張現実感 (AR) システムやテーブルトップシステムに物理モデルを導入し，仮想物体の操作をより自然で馴染みやすいものとする試みを行っている．しかし，操作対象は単純な形状のブロックや，アイコンなどに留まっていた．北村ら [13] の研究では，仮想物体を配置する際に磁石のメタファを導入し，向かい合う面を拘束状態にすることで自由度を下げ，操作を容易にするという試みがなされている．

本提案方法はこの試みを発展させ，より一般化するものであり，同じく物理モデルを導入することで操作の快適性が増し，応答の心地よさが向上することが十分期待される．

2.3 適用するメタファ：疑似的物理状態

本提案手法が扱うオブジェクトでは，回転や移動で「意図しない力が加わっても簡単に分解することはない」が，しかるべき接触・接合部に「少し適切な力を加えると分解できる」という操作・分解のモデルを導入する．この条件を満たす具体的なメタファとして，まず「磁石」「ゴム状接着剤」「ジョイント」の 3 種類を考え，その分離・分解の物理的な挙動を視覚化して提示することとした．このうち磁石とゴム状接着剤については，意図しない分解を避けるだけでなく，目的のパーツとは異なる部分を間違って分解してしまうという誤操作も回避可能なものとして実現する．

このメタファは，実際に存在する機械部品や建造物の力学的な性質を正確に模したものではなく,「簡略化，類型化した疑似的物理状態」とでも言うべきもので，ありそうで少し誇張した挙動を描き出すことで，利用者がオブジェクトの分解操作を心地よく感じることを目的としている．

また，本メタファの導入に当たっては，視覚的な挙動だけではなく，その挙動にあわせ，適切なタイミングで付帯的な効果音の提示も行う．操作に音提示を導入した事例としては，Burke ら [14] が視覚のみではなく，聴覚情報を付与することで様々なタスクにおいて，反応時間や操作のパフォーマンスを向上させることができると報告している．また，木村ら [15] や渡辺ら [16] はタッチパネルにスイッチ音を導入し，操作感の向上，操作に安心感を付与している．こうした先行研究に倣い，本研究では，視覚だけでなく聴覚フィードバックも併せて用いることで操作性を向上させる．

仮想オブジェクトの操作である以上，視覚・聴覚情報に加えて，触力覚提示も併用することが考えられるが，本研究では導入しないものとした．触力覚提示装置に一般的なもの，簡便に利用できるものがなく，視聴覚だけでどれくらいの快適さを描出できるかを試すことにした．

3. メタファの実現

3.1 磁石メタファ

パーツ同士を引き離す際に，あたかもパーツ同士の表面に貼られた磁石を引き離すような感覚を，逆に，パーツ同士を近づけたときにはあたかもパーツ同士の表面にある磁石が互いに引き合うような感覚をユーザに与える．これを実現するため，本研究では北村ら [13] の手法を参考に，パーツの表面に板状の磁石が貼られているというモデルを用いる．これを示す視覚フィードバックとして，接合部に磁石を模した半透明の赤と青の板を表示する．

本研究では，磁石らしい挙動を実現するため以下の 2 種類の場合に分類して考える．

- パーツが初期位置にある場合
- パーツが初期位置から離れている場合

北村らの手法ではこれらの場合に生じるパーツ間の拘束を解除するパラメータとして，2 面の磁石面（以降，拘束面）の重なり面積と，面間の距離を考慮していた．本研究でもこれに倣い，パーツ間に働く拘束力の大きさ Fの算出に重なり面積とパーツ間の距離を用いる．

【パーツが初期位置にある場合】

その場に留まろうとする拘束力 F_{fix} が働いている．これはパーツ同士の拘束面に垂直な方向に働き，拘束面の重なり面積 A_{mag} に比例するものとし，係数 k_{stay} を用いて以下の式で表される．

$$F_{\mathrm{fix}}(A_{\mathrm{mag}}) = k_{\mathrm{stay}} A_{\mathrm{mag}} \qquad (1)$$

このときユーザは F_{fix} の大きさに関わらず拘束面に沿ってパーツをずらすことができ，A_{mag} を動的に変更することが可能である（**図 2 (a)**）．

なお，接着面をずらした場合にパーツから手を離すと，把持していたパーツには，他方のパーツからの磁力による拘束力 F_{attr} が働いて元の位置に戻る．これは A_{mag} に比例し，パーツ間の距離の 2 乗に反比例する．パーツ間の距離は，ユーザが把持しているパーツの拘束面中心の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{p1}}$ と，ペアになるパーツの拘束面中心の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{p2}}$ より算出する．F_{attr} はこれらの値と係数 k_{attr} を用いて次式で表

される（同図 (b)）.

$$F_{\mathrm{attr}}(A_{\mathrm{mag}}, \mathbf{p}_{\mathrm{p1}}, \mathbf{p}_{\mathrm{p2}}) = k_{\mathrm{attr}} \frac{A_{\mathrm{mag}}}{\left|\mathbf{p}_{\mathrm{p1}} - \mathbf{p}_{\mathrm{p2}}\right|^2} \qquad (2)$$

ユーザがパーツの拘束面に対して垂直な方向に加える力 F_{user} が F_{fix} よりも大きくなったとき，初期位置における拘束は解除され，ユーザの意思で自由に動かせるようになる．ここで，F_{user} は，パーツを選択した位置からの手の移動距離に比例するものとし，パーツを選択した瞬間の手の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{h1}}$ と現在の手の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{h2}}$，および係数 k_{user} を用いて次式で表される．

$$F_{\mathrm{user}}(\mathbf{p}_{\mathrm{h1}}, \mathbf{p}_{\mathrm{h2}}) = k_{\mathrm{user}} \left|\mathbf{p}_{\mathrm{h1}} - \mathbf{p}_{\mathrm{h2}}\right| \cos\theta \qquad (3)$$

【パーツが初期位置から離れている場合】

F_{fix} による拘束が解除された場合でも，他方のパーツの磁力の影響範囲にある間は，把持しているパーツには拘束力 F_{attr} が働き，この大きさは式 (2) によって同様に算出される（**図 3 (a)**）．また，磁力の影響範囲の大きさ d は北村らの手法に倣い，係数 k_{thr} を用いて以下の式で求める．

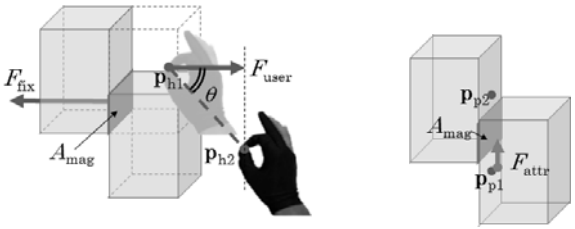
$$d(A_{\mathrm{mag}}) = k_{\mathrm{thr}} \sqrt{A_{\mathrm{mag}}} \qquad (4)$$

パーツが影響範囲内にあるとき（$\left|\mathbf{p}_{\mathrm{p1}} - \mathbf{p}_{\mathrm{p2}}\right| \le d$ のとき）に手を離すと，把持していたパーツは他方のパーツに引き寄せられるように初期位置に戻り，戻った瞬間に衝突音を提示する（同図 (b)）．一方，影響範囲外にある場合（$\left|\mathbf{p}_{\mathrm{p1}} - \mathbf{p}_{\mathrm{p2}}\right| > d$ のとき）は磁力の影響を受けず，手を離した位置に留まり，分解が完了する．このとき，ユーザはジェスチャ操作によって，パーツの平行移動・回転・拡大／縮小が行える（4 章で詳細を述べる）.

3.2 ゴム状接着剤メタファ

パーツ同士を引き離す際に，あたかもパーツ同士の表面に付着しているゴム状接着剤を引き伸ばすような感覚をユーザに与える．本研究では，これを表現するためにパーツ間を弾性体（ばね）で接続したモデルを用いる．**図 4 (a)** に操作のイメージ図を示す．2 つのパーツの間に双円錐状の仮想オブジェクトを視覚フィードバックとして表示することで分解操作の途中経過を視覚的に提示する．同時に，ユーザがパーツを引き離している間，「グググ…」という音提示を行なうことでゴム状接着剤を引き伸ばしている感覚を与える．

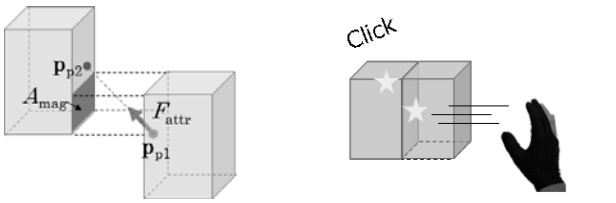
前節で述べた磁石メタファと同様に，パーツ間には引き合う力（粘着力）が生じ，影響範囲内で手を離すとその瞬間に「ヒュッ」という音提示を行い，初期位置まで自動的に戻り，戻った瞬間に衝突音を提示する（同図 (b) 左）．ただし，磁石メタファと異なり，初期位置における拘束は無い．また，一度影響範囲外に移動させたパーツは，間のゴム状接着剤が切断され（この時も「プツン」という音提示を行なう），以降は粘着力が働かないものとする（同図 (b) 右）.



(a) 拘束力 F_{fix} とユーザが加える力 F_{user}
(a) Constraint force F_{fix} and force applied by a user F_{user}

(b) 拘束力 F_{attr}
(b) Attractive force F_{attr}

図 2　磁石メタファ：パーツが初期位置にある場合
Figure 2: Magnet metaphor: Forces when the user releases the part after moving the constraint surface from its initial position.



(a) 拘束力 F_{attr}
(a) Attractive force F_{attr}

(b) F_{attr} に基づく挙動
(b) Behavior based on F_{attr}

図 3　磁石メタファ：パーツが初期位置から離れた場合
Figure 3: Magnet metaphor: Forces and behaviors when the user moves a part from its initial position.

パーツ間に生じる粘着力 F_{adh} はゴム状接着剤の強度係数 k_{str}，初期状態における重なり面積 A_{bond}，パーツ間の距離を用い，以下の式で算出する．

$$F_{\mathrm{adh}}(A_{\mathrm{bond}}, \mathbf{p}_{\mathrm{p1}}, \mathbf{p}_{\mathrm{p2}}) = k_{\mathrm{str}} A_{\mathrm{bond}} \left|\mathbf{p}_{\mathrm{p1}} - \mathbf{p}_{\mathrm{p2}}\right| \qquad (5)$$

ゴム状接着剤メタファは，磁石メタファとは異なり，パーツの操作中に面の重なり面積が変化しても接着剤の量は変化しない，すなわち A_{bond} は定数である．

次に，粘着力の影響範囲の大きさ d は k_{str}，A_{bond} を用いて次式で算出する．

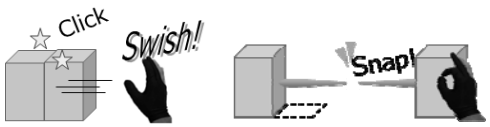
$$d(A_{\mathrm{bond}}) = k_{\mathrm{str}} A_{\mathrm{bond}} \qquad (6)$$

3.3 ジョイントメタファ

パーツ同士がグループごとに金具で固定されており，「叩く」ジェスチャによって金具を外し，グループ化を解除するような操作感をユーザに与える（**図 5 (a)**）．ジョイントメタファは，磁石やゴム状接着剤

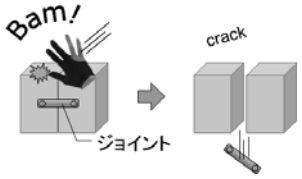


(a) パーツ間の接続の可視化
(a) Visualization of connection between parts

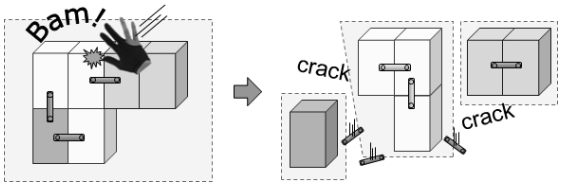


(b) 影響範囲に応じた挙動
(b) Behaviors based on effective area

図 4　ゴム状接着剤メタファ
Figure 4: Rubber-like glue metaphor



(a) 「叩く」ジェスチャによるグループ化解除
(a) Ungroup by slapping gesture



(b) 一括グループ化解除
(b) Ungroup at once

図 5　ジョイントメタファ
Figure 5: Joint metaphor



(a) グループ化解除
（磁石，ゴム状接着剤）
(a) Ungroup (Magnet and rubber-like glue)



(b) グループ化解除
（ジョイント）
(b) Ungroup (Joint)



(c) 移動・回転
(c) Moving and rotating



(d) 拡大／縮小
(d) Scaling

図 6　ジェスチャ操作
Figure 6: Gesture operations

メタファのように，部分的にグループ化を解除するのではなく，同じ階層のグループ化を一度に解除可能であるものとする（同図 (b)）．また，先の 2 種類のメタファとは異なり，強度の概念は無く ON と OFF があるのみである．

本研究ではこれを表現するため，仮想の金具をパーツの接続部に表示し，分解操作によって分解される箇所をユーザに提示する．さらに，ユーザが自身の操作が確実に行なえたかを把握できるよう，グループ化を解除する際に，ジョイントの落下アニメーションを視覚フィードバックとして，また，叩いた音，およびグループ化が解除される「ガラガラ…」という音を聴覚フィードバックとして提示する．

4. ジェスチャ操作

4.1 分解

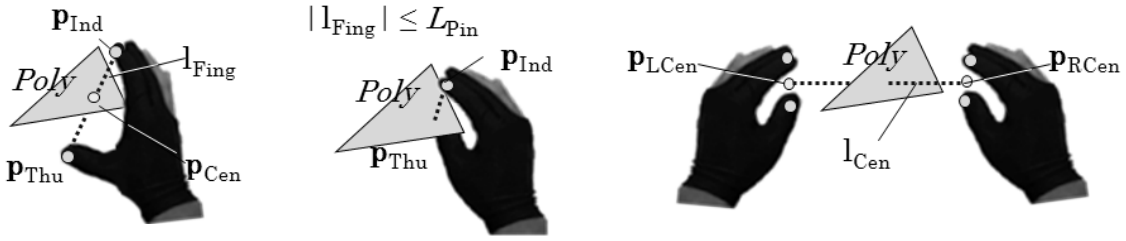
目的のパーツ，あるいは目的のパーツを含むパーツ群（以降，単に「パーツ」と表記する）を分解，すなわちグループ化を解除するには，右手を利用する．磁石メタファ，ゴム状接着剤メタファの場合は「つまむ」ジェスチャを利用し，目的のパーツを選択した後，影響範囲外まで引き離すことでグループ化を解除する（**図 6** (a)）．ジョイントの場合は「叩く」ジェスチャを利用すると同じ階層のグループ化全てが解除される（同図 (b)）．なお，磁石，ゴム状接着剤メタファのときは「叩く」，ジョイントメタファのときは分解のための「つまむ」ジェスチャは利用できない．

4.2 移動・回転

グループ化を解除したパーツを観察するために，パーツ同士の位置関係を保持した移動・回転操作が必要である．本研究では，この操作に左手の位置姿勢を用いる（同図 (c)）．ユーザはまず，移動・回転させたいパーツを左手の「つまむ」ジェスチャによって選択し，その手を移動させる，ひねることによって移動・回転操作を行う．

4.3 拡大／縮小

目的のパーツを詳細に観察したい場合や，小さなパーツを分解したい場合などに，拡大／縮小操作が必要となる．本研究では，まず，左手と右手両方で「つまむ」ジェスチャを行うと両手の間にあるパーツが選択される．続いて，その距離を広げたり狭めたりすることでこれを実現する（同図 (d)）．



(a) パーツの選択　(b) パーツをつまむ　(c) 拡大／縮小
(a) Selecting a part　(b) Picking a part　(c) Scaling

図 7　「つまむ」ジェスチャ
Figure 7: "Picking" gesture



(a) S と $\mathbf{p}_{\mathrm{vertex}}$ との衝突判定　(b) l_{Hand} と *Poly* との衝突判定
(a) Collision detection between S and $\mathbf{p}_{\mathrm{vertex}}$　(b) Collision detection between l_{Hand} and *Poly*

図 8　「叩く」ジェスチャの衝突判定
Figure 8: Collision detection of "slapping" gesture

4.4 ジェスチャの実装

4.4.1 「つまむ」ジェスチャ

分解操作，移動・回転操作時の「つまむ」ジェスチャの処理を以下に述べる．

(1) 親指の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{Thu}}$ と人指し指の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{Ind}}$ を結ぶ線分 l_{Fing} を，パーツのポリゴン *Poly* と交差させることで，そのパーツを選択する（**図 7** (a)）
(2) $|l_{\mathrm{Fing}}|$ を閾値 L_{Pin} 以下まで狭めることで，選択されているパーツを「つまむ」（同図 (b)）

なお，l_{Fing} 上に複数のポリゴンが存在した場合，$\mathbf{p}_{\mathrm{Thu}}$ と $\mathbf{p}_{\mathrm{Ind}}$ の中点 $\mathbf{p}_{\mathrm{Cen}}$ に最も近いポリゴンを含むパーツのみが分解操作，移動・回転操作の対象となる．

次に，拡大／縮小操作時の「つまむ」ジェスチャの処理を以下に述べる（同図 (c)）．右手の親指の 3 次元位置を $\mathbf{p}_{\mathrm{RThu}}$，人差し指を $\mathbf{p}_{\mathrm{RInd}}$，それらの中点を $\mathbf{p}_{\mathrm{RCen}}$ とし，左手の親指と人指し指の 3 次元位置とそれらの中点を $\mathbf{p}_{\mathrm{LThu}}$，$\mathbf{p}_{\mathrm{LInd}}$，$\mathbf{p}_{\mathrm{LCen}}$ とする．

(1) $|\mathbf{p}_{\mathrm{RThu}} - \mathbf{p}_{\mathrm{RInd}}|$，$|\mathbf{p}_{\mathrm{LThu}} - \mathbf{p}_{\mathrm{LInd}}|$ が L_{Pin} 以下になるよう狭める
(2) $\mathbf{p}_{\mathrm{RCen}}$ と $\mathbf{p}_{\mathrm{LCen}}$ を結ぶ線分 l_{Cen} が表示される
(3) l_{Cen} を目的のパーツのポリゴン *Poly* に交差させることでそのパーツを選択する

l_{Cen} 上に複数のポリゴンが存在した場合，そのポリゴンが含まれるパーツすべてが拡大／縮小の対象となる．また，拡大／縮小操作の両手による「つまむ」ジェスチャは分解や移動・回転操作の片手の「つまむ」ジェスチャよりも優先される．

このとき，視覚フィードバックとして，選択されたパーツが属するグループ全体の色を変化させる．さらに，右手による分解操作の場合は，パーツをつまむと，分解されるパーツ全ての色を変化させる．

4.4.2 「叩く」ジェスチャ

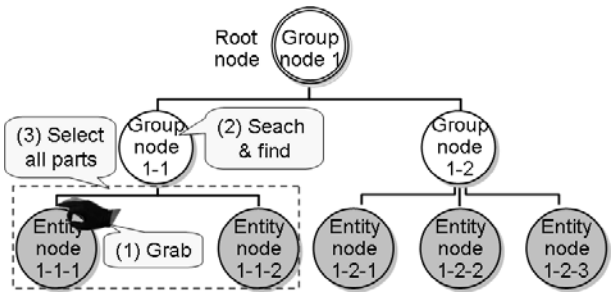
ユーザが「叩く」ジェスチャでグループを解除するためには以下の手順を踏む．

(1) ユーザが右手を閾値 v_{Trig} 以上の速度で移動させることで，衝突判定を開始する
(2) ユーザの右手の甲の 3 次元位置 $\mathbf{p}_{\mathrm{Hand}}$ に，$\mathbf{p}_{\mathrm{Hand}}$ から $\mathbf{p}_{\mathrm{RInd}}$ までの距離 r_{Hand} を半径とする球 S が表示される
(3) 右手を閾値 v_{Hand}（$v_{\mathrm{Hand}} < v_{\mathrm{Trig}}$）以上の速度で移動させている間，各パーツに対して衝突判定を行い，以下の 2 条件のうちいずれかを満たしたとき，そのパーツを叩いた，と判定する

・ 球 S にパーツの頂点 $\mathbf{p}_{\mathrm{vertex}}$ が含まれた場合（**図 8** (a)）
・ $\mathbf{p}_{\mathrm{Hand}}$ と，1 フレーム前の右手の甲の 3 次元位置 $\mathbf{p'}_{\mathrm{Hand}}$ とを結ぶ線分 l_{Hand} が，*Poly* と交差した場合（同図 (b)）

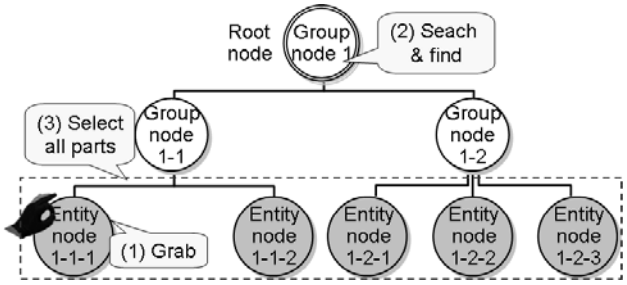
「叩く」ジェスチャによりパーツと衝突すると，一度ジェスチャが終了し再度開始されるまで，衝突判定は行われない．すなわち，1 回の「叩く」ジェスチャで 1 つのパーツしか叩くことはできない．

また球 S にパーツの頂点 $\mathbf{p}_{\mathrm{vertex}}$ が含まれた場合は



(a) 分解操作時（磁石，ゴム状接着剤）

(a) Separation (Magnet and rubber-like glue)

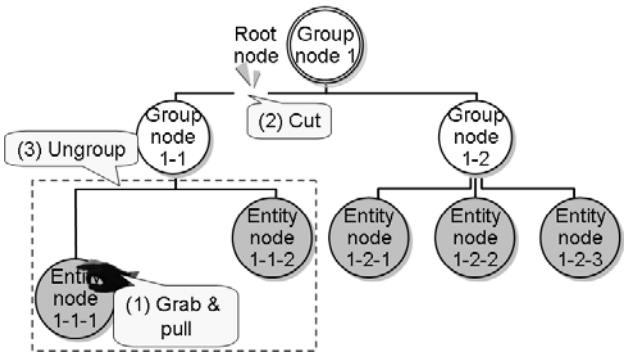


(b) 観察時

(b) Observation

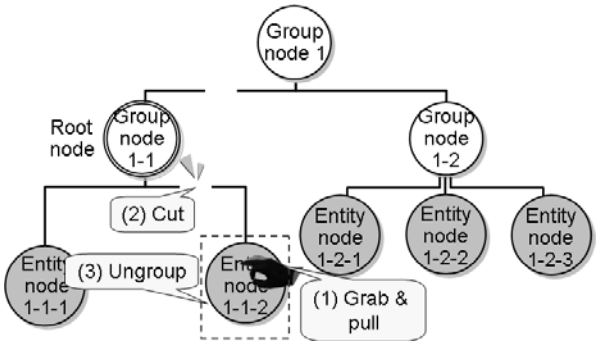
図 9　パーツ選択

Figure 9: Selecting parts



(a) 1 段階目の分解

(a) First level ungrouping



(b) 2 段階目の分解

(b) Second level ungrouping

図 10　グループ化解除（磁石，ゴム状接着剤）

Figure 10: Ungroup (Magnet and rubber-like glue)

4.4.1 (1) でパーツが選択された時と同様に，選択されたパーツが属するグループ全体の色を変化させる．

5. ツリーによるパーツの管理

5.1 ツリーの構造

本研究では図 1 に示すような多段階のグループノードとその終端に接続された 1 段の実体ノード（1 つの実体ノードが 1 つのパーツに対応する）で構成されるツリー（n 分木）によって各パーツを管理する．パーツの選択，グループ化解除はすべてこのツリーに基づいて行われる．

5.2 パーツの選択

【分解操作（磁石，ゴム状接着剤メタファのみ）】

右手でパーツを選択すると，影響範囲外に移動させたときに同グループとして分解されるパーツが選択される．システムはまず，選択したパーツに対応する実体ノードから，ルートノードに向かって探索し，そのときのルートノードに最も近いグループノードを探す．最終的に，当該グループノード以下のパーツを全て「選択」にする（**図 9** (a)）．

【観察（移動・回転・拡大／縮小）操作】

左手でパーツを選択すると，現在同じグループに属しているパーツ全てが選択される．このときシステムは，選択したパーツに対応する実体ノードからルートノードに向かって探索し，ルートノード以下のパーツを全て「選択」にする（同図 (b)）．

5.3 グループ化解除

【磁石メタファ，ゴム状接着剤メタファ】

両メタファとも，パーツを右手で選択した状態で影響範囲外まで移動させた場合にグループ化を解除する．これは前節「分解操作」での探索で発見された最もルートノードに近いグループノードに対し，ルートノードからの接続を切断することで実現する（**図 10** (a)）．また，ルートノードは分解操作の度に更新される（同図 (b)）．

【ジョイントメタファ】

「叩く」ジェスチャによって同じ階層のグループ化を一度に解除する．ここでは，ルートノードに最も近いグループノード全てに対し，ルートノードからの接続を切断することで実現する（**図 11**）．この場合も，既にその接続が切断されている場合はさらに下の階層の接続を切断する．

6. 実装と運用

6.1 MR システムへの実装

前章までに設計した手法を実現するために，両眼

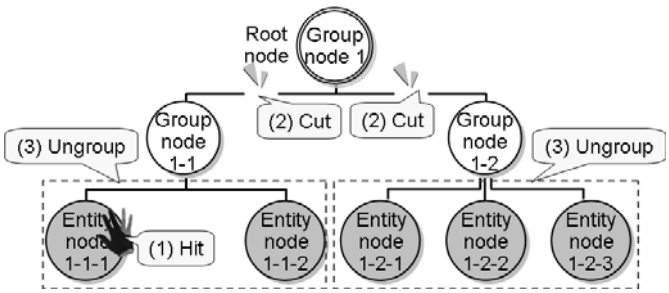


図 11　グループ化解除（ジョイント）

Figure 11: Ungroup (Joint)

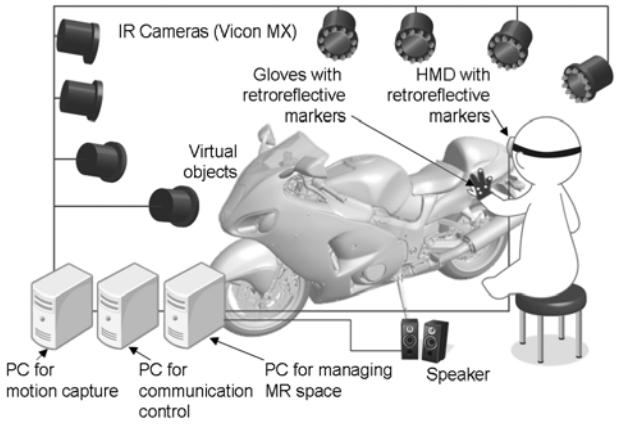


図 12　システム構成

Figure 12: System configuration

立体視可能なビデオシースルー方式の MR システムとして実現した（図 12）．MR 空間の管理・構築には Windows XP OS，Intel Core i7 3.20GHz CPU，3G メモリを搭載する PC を用いた. MR 空間の映像提示にはカメラ内蔵型の HMD（Head Mounted Display）である Canon VH-2002 を用いる．HMD の位置姿勢取得および各種ジェスチャの認識にはモーションキャプチャシステム（ViconPeaks 社製 MX カメラシステム）を使用する．これは，カメラ 8 台とカメラ制御用 PC, 通信制御用 PC 各 1 台から構成される．利用者は，親指，人差し指，手の甲に再帰性反射マーカを貼付した手袋状デバイスを装着し，また，HMD にも再帰性反射マーカを貼付することで 3 次元位置姿勢を検出可能である．モーションキャプチャシステムにより得られたこれらの情報は通信制御用 PC を介して MR 空間管理用 PC に送られる．

MR 空間の生成・提示には，HMD に内蔵された左目，右目用の各カメラからビデオキャプチャカード（ViewCast Osprey 440）を介して実風景を PC へ取り込み，HMD の位置姿勢に合わせた CG を重畳描画した後，グラフィックカード（NVIDIA GeForce GTX 280）からそれぞれ HMD の左目，右目用の各ディスプレイへ出力することでユーザに提示する．また，各種聴覚フィードバックは，スピーカからの音提示で実現する．音の方向解像度は高くないことを考慮して，MR 空間中での定位感までは採用していない.

開発言語には C++を，グラフィックス API には OpenGL および GLUT (OpenGL Utility Toolkit) を使用している.

6.2 運用結果

磁石メタファを用いて分解操作を行っている様子を図 13 に示す. 操作対象が初期位置に拘束されている場合, ユーザが加える力 F_{user} の大きさは円筒の長さで表される．F_{fix} を解除すると，操作対象はユーザの手に追従して移動する.

図 14 にゴム状接着剤メタファを用いて分解操作を行っている様子を示す．ユーザが操作対象を初期位置から移動させると，パーツ間の距離に応じて間をつなぐゴムが伸縮し，同時に，太さが変化する.

ジョイントメタファにおいて，その時点で分解可能な箇所にジョイントを模した視覚フィードバックを描画している様子を図 15 に示す.「叩く」ジェスチャを行うことで，グループ化が解除され，ジョイントが落下し, 各パーツ間に隙間が生じる（図 16）.

図 17 にグループ化を解除したパーツ（パーツ群）に対する移動・回転・拡大／縮小操作を示す.

6.3 考察

実装したシステムは開発チームメンバ，および研究室内のメンバで運用し，以下の知見を得た.

【メタファの有無】

・メタファなしと比較して，メタファありの場合はいずれのメタファにおいても意図せずに分解してしまうことがなくなった，分解操作の開始と終了がわかりやすくなった，といった好意的な意見が多数見られた．また，メタファなしの場合は物足りないがありの方は操作していて心地よい，という意見も得られた．よって，今回導入したメタファは分解操作において操作感の向上に有効であったと考えられる.

【全メタファ共通】

・聴覚フィードバックがあることが心地よいというコメントを得た．特に，ゴム状接着剤メタファは他に比べて聴覚フィードバックが多いため，現在の状況を把握するのに有用であった.

【磁石メタファ】

・初期位置に拘束されている場合，手の位置に応じて円筒が伸縮するがパーツ自体は動かないため，目的のパーツかどうかを，原形を保った状態で確認できるというコメントが得られた．このことから，慎重な分解作業に適していると考えられる.

・F_{fix} によって拘束されている場合でも，拘束面に沿った方向には抵抗無く動くのに違和感を覚える，

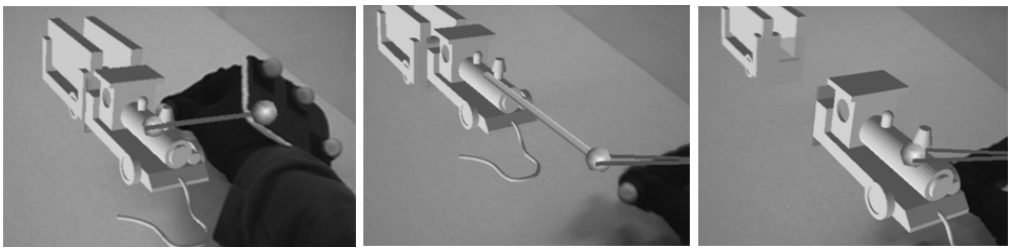


図 13　磁石メタファ（機関車のモデル）
Figure 13: Magnet metaphor: Detaching parts of train using magnet metaphor.

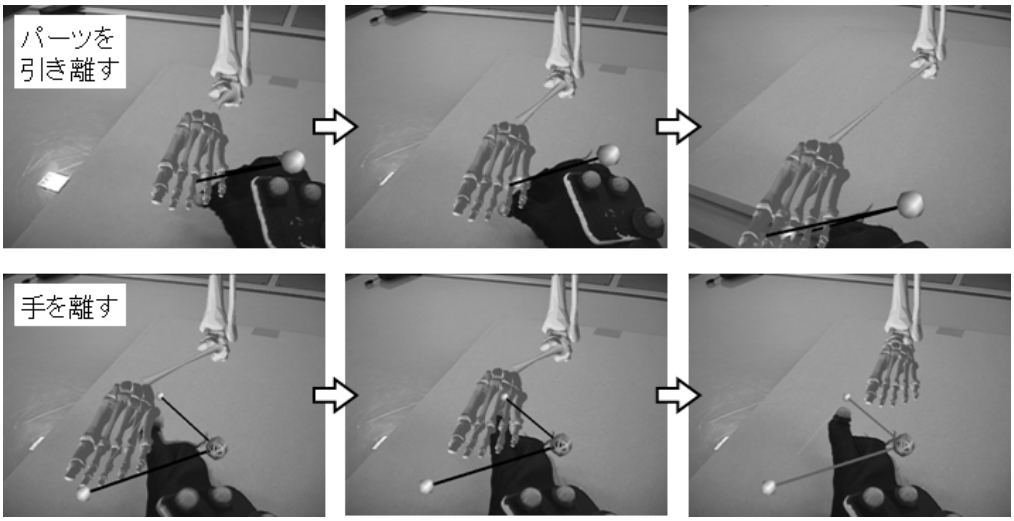


図 14　ゴム状接着剤メタファ（足骨のモデル）
Figure 14: Separating parts of foot bone model using rubber-like glue metaphor.

という意見があった．これについては演出として拘束面に摩擦を感じさせる視聴覚フィードバックを追加することで違和感を軽減できると考えられる．

・影響範囲内で手を離した場合，把持していたパーツは距離に応じた拘束力 F_{attr} によって初期位置に引き戻される．しかし，影響範囲の端で手を離したときには F_{attr} が小さく，移動速度も小さいために，その挙動が緩慢に感じられる，と言う問題があった．これについては，実際の磁石とは異なるが，操作性を重視した挙動を導入するかどうか，導入するならばどの程度であれば違和感無くユーザに受け入れられるのかを検討する必要がある．

・分解操作中のパーツが影響範囲内にあるかどうかが分かりにくい，という意見があった．この問題を解決するために，例えば，現実世界において，砂鉄の粗密によって磁力の強さを観察するのと同様に，点の粗密によって影響範囲を可視化するといった，視覚フィードバックを用いる方法が考えられる．

【ゴム状接着剤メタファ】

・磁石メタファと同様，現在操作しているのが目的のパーツかどうかを確認できる点が好まれた．

・聴覚フィードバックが適宜提示されるため，現在の状況が分かりやすいことが好評であった．視覚フィードバックについても，パーツ間の距離に応じてゴムの長さや太さが変化するため，初期位置からどの位引き離せば影響範囲外に出るのか，現在影響範囲にあるかどうかが明確であるという利点があった．

・影響範囲内で手を離したときの挙動は磁石メタファとは異なり，影響範囲の端にあるほど手を離したときの速度が大きくなる．そのため，挙動に関する不満は特に見られなかった．

【ジョイントメタファ】

・他のメタファは，部分的に分解するためのものであるのに対し，ジョイントメタファでは一括で分解が行えるため，同レベルにある多数のパーツをまとめてグループ化解除したい場合に有用である．これは，操作中に他のメタファに切り替えながら，併用して使うことでより作業効率の向上が図れるという感触を得た．

・磁石，ゴム状接着剤メタファでは，分解操作時に操作しているパーツのみ接着面を示すフィードバックを提示していたが，ジョイントメタファでは常にその段階で分解可能なパーツの接着面を全て表示している．そのため，パーツが密集している場合は接着面も密集しており，どれがどのパーツの接着面なのかがわかりにくい，といった問題があった．この

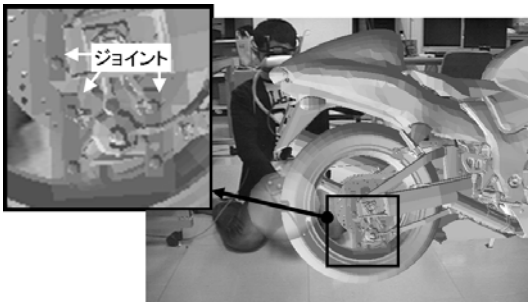


図 15　ジョイントメタファ：
ジョイントの表示（バイクのモデル）
Figure 15: Joint metaphor: Display of virtual joints where the parts connect.

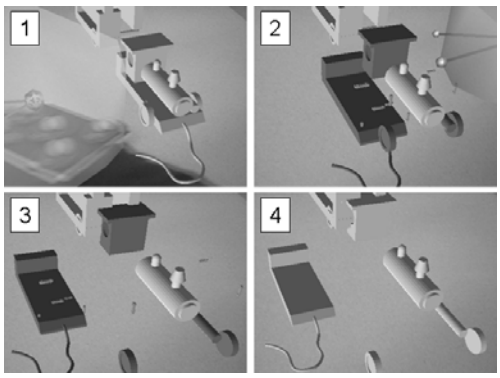


図 16　ジョイントメタファ：分解操作（機関車のモデル）
Figure 16: Joint metaphor: Detaching object.



(a) 移動（奥から手前へ）
(a)　Moving the parts from back to front

(b) 回転
(b) Rotating

(c) 拡大／縮小
(c) Scaling

図 17　グループ化を解除したパーツ（パーツ群）に対する操作（バイクのモデル）
Figure 17: Observation of the parts which were ungrouped (using motorcycle model).

ことから接着面のフィードバックを提示するタイミングや，提示方法をさらに検討する必要がある．

2.3 節で述べたとおり，本研究では以下の 2 種類の誤操作を想定している．

・　意図せずパーツを分解してしまう
・　目的のパーツと異なるパーツを分解してしまう

先述の考察で述べたとおり，「磁石」「ゴム状接着剤」メタファでは両方の問題を，「ジョイント」メタファでは前者の問題を解決していることを確認した．

ここで，ジョイントメタファの場合は「捻って引く」ジェスチャを導入することで，後者の問題を解決可能になると考えられる．これは，磁石メタファのように，元の位置関係をある程度保ったまま確認ができ，パーツ間に仮想の回転式ジョイントを表示することでゴム状接着剤メタファのように，どの程度動かせば分解できるのかを容易に把握できる操作となることが期待される．また，このジェスチャは手を大きく動かす必要が無いため，周囲に障害物がある場合でも操作ができる，疲労が少ないという利点もあると考えられる．

7. むすび

本研究では，3D 空間内に表現された複雑な仮想の 3D オブジェクトを，そのパーツに分解し，じっくり観察するのに適した手法を提案した．その留意点は，意図的な力を適切に加えることにより，簡単に分解できる接着・接合状態と円滑な分解操作の快適さを追求した方法の実現である．

具体的には，オブジェクトの挙動や応答に「磁石」「ゴム状接着剤」「ジョイント」という 3 種類のメタファを導入し，視覚・聴覚フィードバックをユーザに与えることで，誤操作の回避や操作の快適性向上に関して良好な研究開発結果を得た．

実装したメタファは「部分的に分解可能（磁石・ゴム状接着剤メタファ）」「全体を一度に分解可能（ジョイントメタファ）」といった特徴から，用途に応じて使い分けることが想定される．また，前者においても「原形を保ったまま分解可能（磁石メタファ）」「操作が正しく行えているかを常に把握しながら分解可能（ゴム状接着剤メタファ）」といった特徴からユーザの好みに応じて使い分けることも想定される．

今後の発展としては，新しいメタファを実現し，ユーザが選択可能なメタファを増やすことや，各メタファの実現方法についても運用を通してパラメータを調整する．また，どのような効果音を与えるべきかの分析・検討を行い，改善していくことを予定している．

謝辞

本研究の一部は，学振・特別研究員奨励費（課題番号 20・9217）「空間型作業を支援するポスト WIMP 型インタフェースの開発」並びに科研費・基盤研究 (A)「視聴覚併用複合現実空間の表現力向上に関する研究」の支援による．

参考文献

[1] I. Poupyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Ichikawa: “Go-Go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in VR,” Proc. UIST 1996, pp. 79 - 80, 1996.

[2] D. A. Bowman and L. F. Hodges: “An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments,” Proc. Symp. Interactive 3D Graphics, pp. 35 - 38, 1997.

[3] T. Grossman and R. Balakrishnan: “The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays”, Proc. UIST 2006, pp. 3 - 12, 2006.

[4] A. Olwal and S. Feiner: “The Flexible Pointer - An interaction technique for selection in augmented and virtual reality,” Conf. Suppl. UIST 2003, pp. 81 - 82, 2003.

[5] T. Sielhorst, C. Bichleier, S. Heining, and N. Navab: “Depth perception a major issue in medical AR: Evaluation study by twenty surgeons,” Proc. MICCAI 2006, pp. 364 - 372, 2006.

[6] N. Elmqvist, U. Assarsson, and P. Tsigas: “Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: Design issues and evaluation,” Proc. INTERACT 2007, pp. 532 - 545, 2007.

[7] H. Sonnet, S. Carpendale, and T. Strothotte: “Integrating expanding annotations with a 3D explosion probe,” Proc. AVI 2004, pp. 63 - 70, 2004.

[8] W. Li, M. Agrawala, B. Curless, and D. Salesin; “Automated generation of interactive 3D exploded view diagrams,” ACM Trans. Graphics, Vol. 27, No. 3, Article 101, 2008.

[9] D. Kalkofen, M. Tatzgern, and D. Schmalstieg: “Explosion diagrams in augmented reality,” Proc. IEEE Virtual Reality 2009, pp. 71 - 78, 2009.

[10] P. Song, H. Yu, and S. Winkler: “Vision-based 3D finger interactions for mixed reality games with physics simulation,” Proc. VRCAI '08, Article 7, 2008.

[11] A. D. Wilson, S. Izadi, O. Hilliges, A. G.-Mendoza, and D. Kirk: “Bringing physics to the surface,” Proc. UIST 2008, pp. 67 - 76, 2008.

[12] A. D. Wilson and H. Benko: “Combining multiple depth cameras and projectors for interactions on, above and between surfaces,” Proc. UIST 2010, pp. 273 - 282, 2010.

[13] 北村喜文，イーエイミー，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.

[14] J. Burke, M. Prewett, A. Gray, L. Yang, F. Stilson, M. Coovert, L. Elliot, and E. Redden: “Comparing the effects of visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: a meta-analysis,” Proc. ICMI 2006, pp. 108 - 117, 2006.

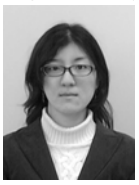
[15] 木村朝子，大町英之，柴田史久，田村秀行：“効果音によるタッチセンサへの押下感提示の研究”，情報処理学会研究報告書 2007-HCI-124, pp. 9 - 16, 2007.

[16] 渡辺北斗，木村朝子，柴田史久，田村秀行：“タッチセンサ入力に操作感を付与する効果音についての諸考察”, 第 71 回情報処理学会全国大会講演論文集 (4), 2Y-1, pp. 161 - 162, 2009.

(2010 年 12 月 13 日受付)

［著者紹介］

大槻 麻衣（正会員）



2006 年立命館大・理工・情報卒．現在，同大学院博士後期課程在学中．2008 年より学振・特別研究員．2011 年 4 月より同大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー．博士（工学）．複合現実感，ポスト WIMP 型インタフェースの研究に従事．2009 年本学会論文賞を受賞．

大下 勉



2011 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒．4 月より，同大学院博士前期課程在学中．卒業研究にて，3 次元複合現実空間における物体操作に関する研究に従事．

（下記 3 名の写真・経歴等は，本号の他論文を参照）

柴田 史久（正会員）

1999 年阪大・基礎工・博士後期課程了．現在，立命館大学情報理工学部准教授．博士（工学）．

木村 朝子（正会員）

1998 年阪大・基礎工・博士前期課程了．現在，立命館大学情報理工学部准教授．博士（工学）．

田村 秀行（正会員）

1970 年京大・工・電気卒．現在，立命館大学情報理工学部教授．工学博士．