

3D 空間における仮想物体の分解・観察に適した操作法の提案

大槻 麻衣 大下 勉 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 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

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

あらまし 本研究では、立体視可能な複合現実空間において、多数のパーツから構成される仮想の 3D オブジェクトを分解し、その内部や個々のパーツ同士の接続関係、位置関係を至近距離で観察できるシステムを構築する。こうした分解・観察というタスクにおいて誤操作を回避し、操作の快適性、応答の心地よさを向上させるために、実世界で互いに接合・接着された物体の挙動や応答を模倣する 3 種類のメタファを導入する。本論文では、提案手法の基本概念、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論じる。

キーワード 複合現実感, 分解・観察, ジェスチャ, メタファ, 物理モデル, 音フィードバック

A Realization 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

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ. 1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

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

Abstract In this research, we consider about the manipulation of 3D virtual objects which consist of many parts in mixed reality space. We propose a method that users can pick up a part of the object which they need, not all of models, and observe position relations and connection between each object from various directions. Our method uses metaphors of the real world. This makes it possible to avoid wrong operations, and improve the operational feeling and responsiveness. This paper describes that the detail of our proposed method, the metaphors and physics model using this research, implementation of the system that can realize the method using gestural input, and the findings via using the system and future works.

Keyword Mixed Reality, Separation and observation, Gesture, Metaphor, Physics, Sound feedback

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) 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 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いないが、仮想物体を実時間対話型で操作する技術は着実に進歩しており、工業製品の設計・製造、ビデオゲーム、Web ページ、携帯電話の画面にも 3D-CG オブジェクトが提示され、それを直接操作し、直ちに応答を得ることが可能となっている。

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、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。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。3次元位置決定精度の問題は勿論、人間の両眼立体視で

は奥行き情報を正確に把握できず、煩雑な 3D オブジェクトの操作にはごちなさが残るという問題がある。こうした本質的問題があり万能の解決法を見つけ難い状況で、我々は対象や用途がある程度限られた 3D オブジェクトに適した表示・操作方法を提案・実装する。

本研究で実現するのは、MR 空間に配置された、多数のパーツから構成される仮想の 3D オブジェクトを分解し、その内部や個々のパーツを至近距離で移動・回転・拡大／縮小を行いながら (立体映像として) 観察できるシステムで、早い操作感が得られるユーザ・インタフェースである。対象は、CAD 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などで、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。

操作の快適さを実現するために、接続・接着状態に 3 種類のモデルを導入し、各分離・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、多少誇張した自然らしさを追及する。

本論文では、提案手法の基本概念、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

1章で述べたとおり本研究では、両眼立体視が可能なMR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オブジェクトを分解・観察する作業を想定している。

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・ツールなどでよく見られ、本研究でもその流儀を踏襲する。

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、グループ化解除の際に、パーツ間の接続・接着のモデルとして、2.3節で述べる実世界のメタファを採用する。各メタファに基づいた自然な視覚的効果を与えることで、この分解作業における誤操作を回避し、操作の快適性・応答性を向上させる。

また、VR空間でなく、MR空間を採用する理由を以下に記す。

- (a) 分解操作を円滑に行うためにはVR空間で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) 複数人が協調作業可能なシステムへの発展を考えると、他の体験者を視認できるMR表示が好ましい
- (c) 操作対象が仮想物体であっても、その大きさを実感するには比較可能な実物体が存在するMR表示の方が好ましい

2.2. 関連研究

仮想物体の選択には、実世界の手動きによって手形状のカーソルを操作する方法[1]や仮想の光線で指し示す方法[2]などがあるが、空間中に多数のオブジェクトが存在し、重なり合っている場合には簡単には適用できず、本研究で想定する操作には適さない。

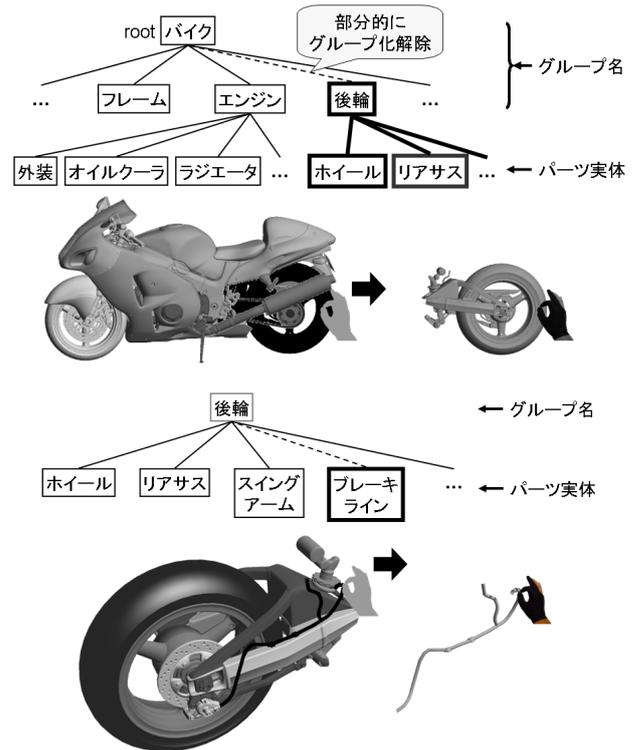


図1 多段階でグループ化された仮想3Dオブジェクトの分解・観察の例

複雑な構造を持つオブジェクトの分解・観察には覗き窓を作る手法[3]や表面を透過させて内部を表示する手法[4]が提案されている。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を把握するのは困難である。個々のパーツを展開して表示するExplosion diagramを用いる手法[5]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検討されていない。

Wilsonら[6]は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アイコンなどに留まっていた。北村ら[7]は、仮想物体を配置する際に磁石のメタファを導入し操作を容易にする手法を提案している。本提案方法はこれを発展させるものであり、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

提案手法では、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「適切な力を適切な場所に加えると分解できる」という分解モデルを導入する。これ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、その物理的な挙動を視覚化して提示する。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、実際の力学的な性質を正確に模したのではなく、「簡略化、類型化した疑似的物理状態」であり、少し誇張した挙動を描画することで、利用者が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、視覚的な挙動の提示だけではなく、その挙動にあわせた音提示も行う。操作に音提示を導入した事例としてはタッチパネルにスイッチ音を導入し、操作感を向上させ、操作に安心感を付与する例がある [8][9]。こうした先行研究に倣い、我々も視覚・聴覚フィードバック両方を用いて操作性を向上させる。

仮想物体の操作である以上、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、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いため、本研究では導入せず、視聴覚のみで快適さの描出を試みる。

3. メタファの実現とジェスチャ操作

3.1. 接着・接合のメタファ

3.1.1. 磁石メタファ

本研究では北村ら [7] 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、さらに磁石らしい挙動を実現するため以下の2種類の磁力による拘束力を考慮する。

- (a) パーツが初期位置にあるときに働く拘束力
- (b) パーツが初期位置から離れた後にパーツ間に働く拘束力

北村らの手法ではこれらの拘束を解除するパラメータとして、拘束状態にある2面の磁石面（以降、拘束面）の重なり面積と、2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 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。

$$F_{fix}(A) = k_{stay} A \quad (1)$$

ユーザは拘束面に沿ってパーツをずらすことができ、 A を動的に変更することが可能である (図 2 (a))。

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}_{h1} と現在の手の3次元位置 \mathbf{p}_{h2} 、および係数 k_{user} を用いて次式で表される。

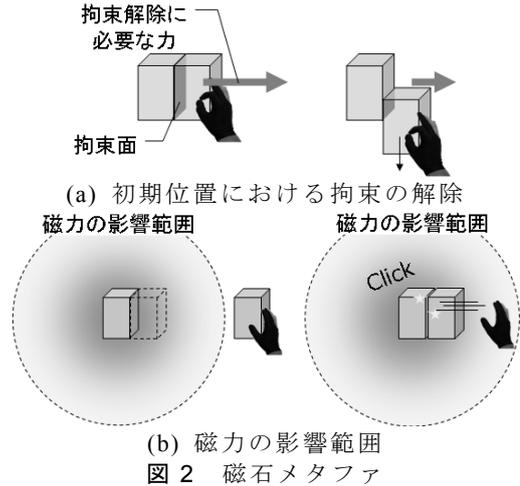


図 2 磁石メタファ

$$F_{user}(\mathbf{p}_{h1}, \mathbf{p}_{h2}) = k_{user} |\mathbf{p}_{h1} - \mathbf{p}_{h2}| \quad (2)$$

【パーツが初期位置から離れた場合】

他方のパーツからの磁力による拘束力 F_{attr} が働く。これは A 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}_{p1} とペアになるパーツの拘束面中心の3次元位置 \mathbf{p}_{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。

$$F_{attr}(A, \mathbf{p}_{p1}, \mathbf{p}_{p2}) = k_{attr} \frac{A}{|\mathbf{p}_{p1} - \mathbf{p}_{p2}|^2} \quad (3)$$

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。

$$d(A) = k_{thr} \sqrt{A} \quad (4)$$

パーツが影響範囲内にある場合 ($|\mathbf{p}_{p1} - \mathbf{p}_{p2}| \leq d$ 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 (図 2 (b))。一方、影響範囲外にある場合 ($|\mathbf{p}_{p1} - \mathbf{p}_{p2}| > d$ のとき) は磁力の影響を受けず、手を離れた位置に留まる。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 (3.2 節で詳細を述べる)。

3.1.2. 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。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 3 (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物体を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。

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自動的に

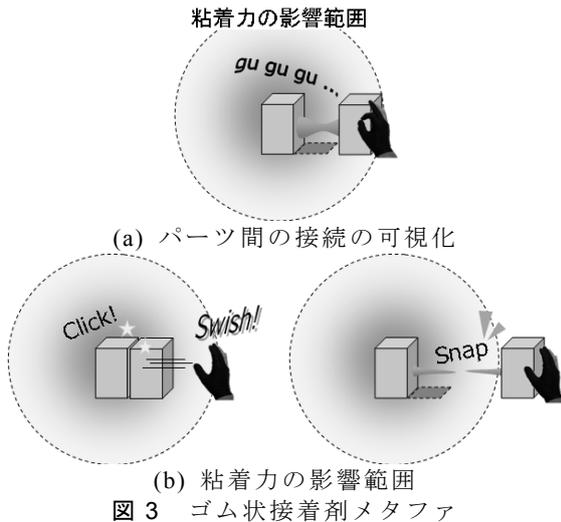


図3 ゴム状接着剤メタファ

初期位置に戻る (同図 (b) 左). ただし, 磁石メタファと異なり初期位置での拘束は無い. 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, 以降は粘着力が働かない (同図 (b) 右).

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

$$F_{adh}(A, \mathbf{p}_{p1}, \mathbf{p}_{p2}) = k_{str} A |\mathbf{p}_{p1} - \mathbf{p}_{p2}| \quad (5)$$

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 は定数である.

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

$$d(A) = k_{str} A \quad (6)$$

また, ここでは, ゴムを引き伸ばす間, 手を離れた瞬間, 初期位置に戻った瞬間, 接続が切断された瞬間に効果音を提示する.

3.1.3. 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すような操作感をユーザに与える (図4 (a)). ジョイントメタファは, 磁石やゴム状接着剤メタファのように, 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, 強度の概念は無く ON と OFF があるのみである.

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, 次に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できたかを把握できるように, グループ化を解除する際に, 視覚フィードバックとしてジョイントの落下アニメーション, 聴覚フィードバックとして叩いた音およびグループ化が

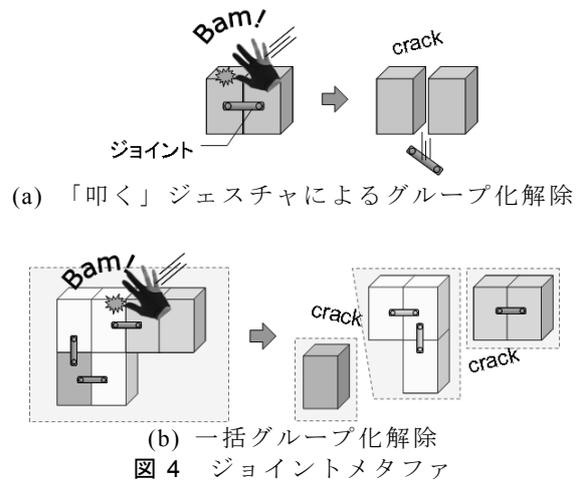


図4 ジョイントメタファ

解除される音を提示する.

3.2. ジェスチャ操作

3.2.1. 分解

磁石メタファ, ゴム状接着剤メタファの場合は右手で「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部分的にグループ化を解除する (図5 (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)).

3.2.2. 移動・回転

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することで, 左手の位置姿勢を用いてパーツ同士の位置関係を保持したまま移動・回転が行える (同図 (c)).

3.2.3. 拡大／縮小

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拡大／縮小が行える (同図 (d)).

4. 実装と運用

4.1. 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6). MR 空間の管理・構築には Windows XP OS, Intel Core2 Duo E4300 CPU 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,



図 5 ジェスチャ操作

HMD にも再帰性反射マーカを貼付することで 3 次元位置姿勢を推定可能である。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 に内蔵された左目用、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 Quadro FX 1700) 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。

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。

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。

4.2. 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 7 に、拘束面をずらしている様子を図 8 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、初期位置における拘束を解除すると、操作対象はユーザの手に追従して移動する。

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図 9 に示す。パーツ間の距離に応じて間を

つなぐゴムが伸縮すると同時に、太さに変化する。

ジョイントを用いた分解操作の様子を図 10 に示す。1 段階目のグループ化を解除すると、2 段階目のグループ化の状態に応じたジョイントを表示する (同図 (a))。グループ化を解除した瞬間に、ジョイントが落下し、各パーツ間に隙間が生じる (同図 (b))。

4.3. 考察

実装したシステムを運用し、以下の知見を得た。

【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、力の大きさを表す円筒は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、原形を保った状態で確認できる。そのため、慎重な分解作業に適していると考えられる。
- ・影響範囲内で手を離し、把持していたパーツが距離に応じた磁力 F_{attr} によって初期位置に引き戻されるとき、影響範囲の端で手を離すと F_{attr} が小さく、初速度も小さいために、その挙動が緩慢に感じられる、という問題があった。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、導入するならば違和感の無い範囲での演出について検討する必要がある。
- ・選択しているパーツが影響範囲内にあるかが分かりにくい、という意見があった。これを解決するために矢印状の視覚フィードバックを表示し、その濃淡で磁力の強度や向きを提示するという方法が考えられる。

【ゴム状接着剤メタファ】

- ・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感触であった。視覚フィードバックについても、パーツ間の距離に応じたゴムの伸縮、太さの変化によって、現在影響範囲にあるかどうか、どの位引き離せば影響範囲外に出るのが明確であるという利点があった。

【ジョイントメタファ】

- ・一括で分解が行えるため、他のメタファと併用することで作業効率の向上が図れるという感触を得た。
- ・このメタファのみ、1 章で述べた「目的のパーツとは異なる部分を間違っ て分解する」という誤操作に対応していない。これに対応するために、「捻って引く」

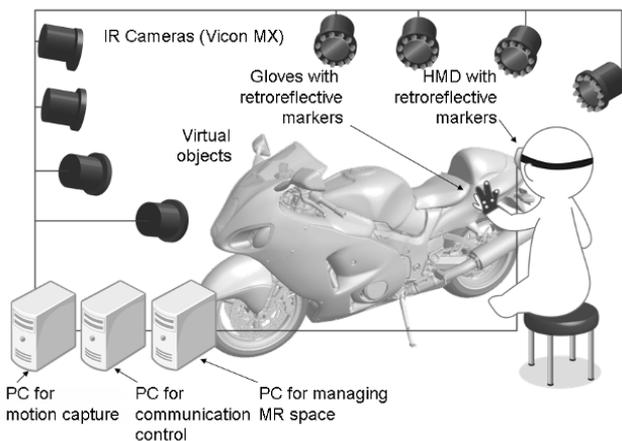


図 6 システム構成

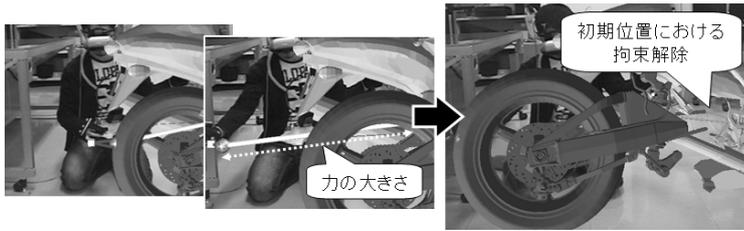


図 7 磁石メタファ（操作対象：バイクのモデル）

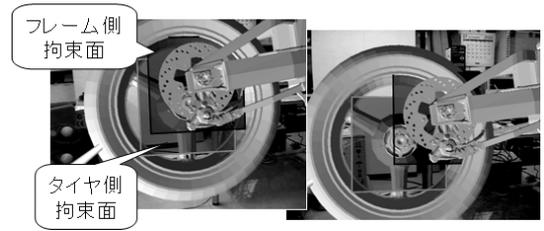


図 8 拘束面をずらしている様子

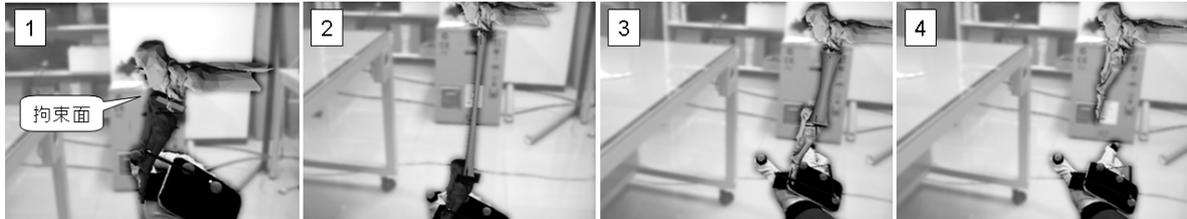
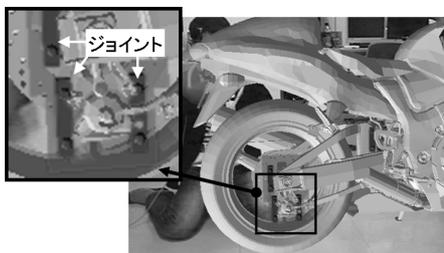
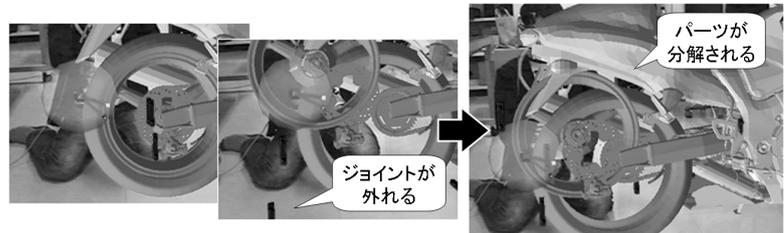


図 9 ゴム状接着剤メタファ（操作対象：足骨のモデル）
 パーツをつまんで引き伸ばし (1, 2), 手を離すとパーツが元の位置に戻る (3, 4)



(a) 1段階目のグループ化を解除した様子



(b) 2段階目のグループ化解除の様子

図 10 ジョイントメタファ（操作対象：バイクのモデル）

タイプのジョイントメタファを導入することが考えられる。これにより、元の位置関係にある程度保ったまま、目的のパーツかどうかを確認可能であり、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、手を大きく動かす必要が無い場合、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。

5. むすび

本研究では、MR 空間において複雑な仮想物体をパーツ単位に分解し、移動・回転・拡大／縮小しながら観察するのに適した手法を提案した。具体的には、物体の挙動や応答に実世界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、操作の快適性向上を実現し、定性的ながら良好な研究開発結果を得た。

今後は、定量的な分析、異なるメタファの追加について検討する。音提示についても、音を付加することの効果は明らかであったが、どのような効果音を与えるべきかについては更なる分析・検討が必要である。

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」の支援による。

文 献

- [1] I. Poupyrev *et al.*: “Go-Go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in VR,” Proc. UIST 1996, pp. 79 - 80, 1996.
- [2] D. A. Bowman *et al.*: “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. Sielhorst *et al.*: “Depth perception a major issue in medical AR: Evaluation study by twenty surgeons,” Proc. MICCAI 2006, pp. 364 - 372, 2006.
- [4] N. Elmquist *et al.*: “Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: Design issues and evaluation,” Proc. INTERACT 2007, pp. 532 - 545, 2007.
- [5] D. Kalkofen *et al.*: “Explosion diagrams in augmented reality,” Proc. IEEE VR 2009, pp. 71 - 78, 2009.
- [6] A. D. Wilson *et al.*: “Bringing physics to the surface,” Proc. UIST 2008, pp. 67 - 76, 2008.
- [7] 北村喜文 他: “面間の動的拘束を用いた仮想物体の操作補助法”, 信学論, Vol. J79-A, No. 2, pp. 506 - 517, 1996.
- [8] 木村朝子 他: “効果音によるタッチセンサへの押下感提示の研究”, 情処研究報告 2007-HCI-124, pp. 9 - 16, 2007.
- [9] 渡辺北斗 他: “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 回情処全大講演論文集 (4), 2Y-1, pp. 161 - 162, 2009.