

# ElasticConnections：3D空間における複雑な仮想物体の 観察・分解手法に関する研究

大槻 麻衣<sup>1,a)</sup> 大下 勉<sup>2</sup> 木村 朝子<sup>1</sup> 柴田 史久<sup>1</sup> 田村 秀行<sup>1</sup>

受付日 2013年6月21日, 採録日 2014年1月8日

**概要:** コンピュータの性能向上にともない, 多数のパーツが複雑に組み合わさった 3D 仮想物体 (3D CAD で設計された工業製品や建築物, 人体モデルなど) を扱うことが可能となった. 本研究では, このような複雑な構造を持つ仮想物体を用いた構造把握・学習などの用途を想定し, 3次元空間において, (1) 各パーツ間の関係性 (接続状態, 強度, グループ関係) を観察しながら, (2) パーツのサイズや形状, 配置などが様々であっても複数のパーツを効率的に分解可能, という 2つの特徴を持つ, 「ゴムメタファ」を活用した観察・分解手法を提案する.

**キーワード:** 複合現実感, 分解, 観察, ゴムメタファ, 関係性

## ElasticConnections: Observing and Ungrouping Methods for Complex Virtual Objects in 3D Space

MAI OTSUKI<sup>1,a)</sup> TSUTOMU OSHITA<sup>2</sup> ASAKO KIMURA<sup>1</sup> FUMIHISA SHIBATA<sup>1</sup> HIDEYUKI TAMURA<sup>1</sup>

Received: June 21, 2013, Accepted: January 8, 2014

**Abstract:** Today's technology enables users to manipulate complex, multi-part 3D virtual objects such as industrial products, structures designed by CAD, and models of the human body in 3D space. We propose a system that realizes gesture-based separation and observation of a group of parts from complex virtual objects in 3D space. One practical application of our system is for training, such as learning the structures of the human body or industrial products. By using an elastic metaphor, our method enables users to (1) observe the relationship (connection and its strength) between the parts and (2) separate a part of the object efficiently.

**Keywords:** mixed reality, ungroup, observation, elastic metaphor, relationship

### 1. 緒論

コンピュータの性能向上にともない, 3D CAD で設計された車やバイクのような工業製品モデル, 様々な臓器を内包する人体モデルなど, 複数のパーツが入り組んだ複雑な構造を持つ仮想物体が扱えるようになった [1].

このような複雑な仮想物体を用いた構造把握・学習を目的とし, これまでに著者らは立体視可能な複合現実 (Mixed

Reality; MR) 空間において, 多段階でグループ化された仮想物体をジェスチャ操作によって順にグループ化を解除・分解し, 取り出したパーツ群の外観を観察可能な手法を検討してきた [2]. MR 空間で立体的に表示し, 自身の手を見ながら直接対象に触れて操作することで, マウスと 2D ディスプレイを用いた既存のシステムに比べてより直観的な操作が可能となる. 前研究 [2] では, 分解時における誤操作の回避と操作感の向上を目的として, 階層的にグループ化されたパーツの挙動に「ゴムメタファ」を導入した. 具体的には, パーツ間を仮想のゴムでつなぎ, グループ化の解除に「ゴムを引きちぎる」という条件を設けて誤操作を回避し, メタファに基づいた視聴覚フィードバック (以

<sup>1</sup> 立命館大学  
Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

<sup>2</sup> 株式会社日立製作所  
Hitachi Ltd., Chiyoda, Tokyo 100-8280, Japan

a) otsuki@rm.is.ritsumei.ac.jp

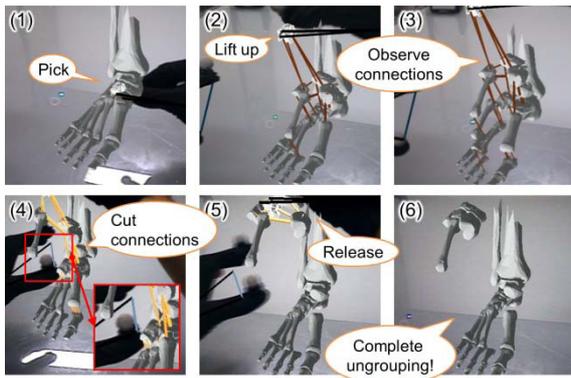


図 1 提案手法による観察と分解

Fig. 1 Observing and ungrouping by proposed method.

降, FB と表記) を提示することで操作感を向上させた。

しかし, あらかじめ設定されたグループでしか取り出せず, 個々のパーツどうしのつながりを観察するためには, 何度もグループ化を解除する必要があった。

そこで本研究では前研究を発展させ, 取り出したパーツ群の外観の観察だけでなく, 分解時に個々のパーツ間のつながりやその強度 (ここでは, 物理的な接続の強度だけでなく, 同じグループに属するパーツは強度が強く, 異なるグループに属するパーツは強度が弱い, といった意味的な接続の強度も含む) を観察しながら, ユーザが, 容易かつ正確にパーツ群を選択・分解可能な手法を提案する。

提案手法では, ユーザがあるパーツを持ち上げると, 連結しているパーツが徐々に展開され, ゴムメタファに基づいた仮想のゴムの視聴覚 FB をパーツ間に表示する。図 1 に提案手法による観察と分解の様子を示す。ユーザは (i) 仮想のゴムの有無やその太さによって個々のパーツ間のつながりやその強度など, パーツ間の関係性を観察する。(ii) 不要なパーツとの間のゴムの切断することによって, 任意のパーツ群を分解する。

本稿では, まず関連研究について述べた後, それをふまえて設計した提案手法について述べる。次に, 提案手法を実現するためのパーツ間に働く反発力と弾性力の導入, およびパーツ間の関係性の表現方法, ジェスチャによる分解方法, システム構成について述べ, 最後に, 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. 関連研究

### 2.1 観察

これまでに, 多数のパーツからなる複雑な仮想物体の観察を目的に, 手前のパーツを透過し内部を表示する手法 [3], [4] が提案されている。しかし, 外側にあるパーツを消してしまうため「外側のパーツの裏側がどんな形状で内側のパーツとつながっているか」は観察できない。一方, 提案手法では, 外側のパーツを持ち上げて覗き込むことで外側のパーツも内側のパーツも観察が可能である (利点 1)。

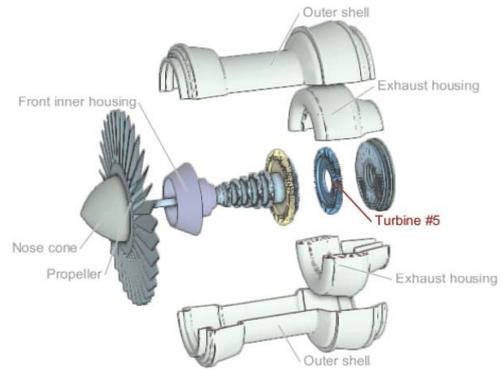


図 2 Li らの Explosion Diagram によるパーツの展開例

Fig. 2 Example of Explosion Diagram by Li et al. [5]

また, パーツの「位置関係」に沿ってパーツを展開させ, その構造の観察を可能にする Explosion Diagram [5] という手法がある。この手法によるパーツの展開例を図 2 に示す。この手法では, 複数の層に分かれて展開した場合, 図 2 の Outer shell と Front inner housing のように, 実際には接続しているパーツが大きく離れて表示され, 接続関係の把握が困難になる場合がある。逆に, すべてのパーツを展開して表示してしまうので実際に接続していなくても接続しているように見える可能性もある。提案手法では, 接続関係を仮想のゴムによって明示するため, こうしたあいまいさをなくすることができる (利点 2)。加えて, 仮想のゴムによって接続関係を明示することで,

- 観察の際にパーツを移動させても, 元の位置が分かる (利点 3)
  - 足の指先の骨のように, 類似した形状のパーツが複数あっても, その場所を正しく把握できる (利点 4)
- さらに, 仮想のゴムの見た目を変化させることにより,
- パーツどうしの結合の強さ (ねじ止めか溶接か, など) を表現することができる (利点 5)

また, グラフによってネットワークの可視化を行う Natto view [6] という手法が提案されている。これは 1 つのノードを持ち上げることで, そのノードを中心に, ユーザが段階的にグラフ全体のノード間の接続を観察することができる。本研究では, これを複雑な仮想物体の観察・分解に適用し, ユーザがパーツを段階的に展開していくことで, 元の仮想物体の全体像を把握したまま操作できるようにする (利点 6)。

### 2.2 選択と分解

任意のパーツ群を分解して取り出すためには, 必要なパーツ群を選択する必要がある。仮想物体の選択は基礎的な操作であるため, 人工現実感 (Virtual Reality; VR) 分野では多数の研究が行われてきた [7]。たとえば, 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手法 [8], [9] や, 仮想の光線を用いて仮想物体

を指し示し、選択を行う手法 [10] などがある。

ユーザが操作したい対象が複雑な場合、つまり、3D 空間中に他の多数の仮想物体が存在している場合に、他のパーツによって隠されているパーツを選択する手法や、近傍のパーツと間違えずに目的のパーツを正確に選択するための手法が多数提案されている [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. しかしこれらの手法は、単一の仮想物体の選択が目的であり、本研究で目的とする、パーツ群をまとめて選択するものではない。

複数の仮想物体をまとめて選択する手法としては、既存の 2D アプリケーションで使われているような矩形、円形選択や投げ縄ツールで目的の仮想物体を囲む手法 [18], [19] が一般的である。しかし、2 次元の選択範囲であるため、ユーザから見えているパーツしか選択できない、あるいはユーザから見えていなくても背後にあるパーツすべてを選択することになってしまう (利点 7)。

仮想物体は 3 次元的に配置されているため、3 次元の角錐 [20] や直方体 [21], [22] の選択領域を用い、範囲内に含まれるすべてのパーツを選択する手法もある。これらは奥行きも考慮した選択ができるが、選択領域の形状を操作する必要がある。また、選択領域の形状がシンプルな分、図 3 に示すように、足骨モデルなど、パーツが入り組んだ仮想物体から複雑な形状を取り出す場合などに、不要なパーツが選択領域に入ってしまう場合がある。

Stuerzlinger ら [23] や Oh ら [24] は、各パーツの位置関係や選択したパーツの移動方向によって、同時に動くパーツ群を決定する手法を提案している。しかし、図 3 に示すような、パーツの移動方向に必要なパーツと不要なパーツが混在する場合に必要なパーツのみを抜き出すのは困難である。

いずれの手法も複数回に分ければ選択・分解可能であるが、煩雑な操作になってしまう。一方、提案手法では、任意のパーツの持ち上げによってパーツを展開し、不要なパーツとの間のゴムを切断していくことで、任意のパーツ群の分解を実現するため、こうした複雑な配置でも柔軟に取り出せる (利点 8)。

また、市販のモデリングソフトでは別ウィンドウを介しパーツを選択することができる (Autodesk 社 Maya の outliner/hypergraph, 同 3dsMax の schematic view,

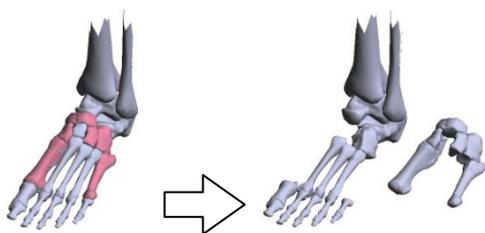


図 3 複雑に配置されたパーツの分解

Fig. 3 Example of ungroup in the case of complex model.

NewTek 社 Lightwave の scene editor, e frontier 社 Shade のブラウザなどが、間接的な操作である。仮想物体から複数のパーツをまとめて群として取り出したい場合に、ウィンドウ上で目的のパーツを探して選択していく方法は、パーツの数があれば増えるほど煩雑になり、時間がかかる。本研究では、別ウィンドウを介することなく仮想物体を直接操作でき、着目するパーツから伸びる仮想のゴムをたどり、不要なパーツとの間のゴムのみを切断するだけで取り出すことが可能である (利点 9)。

### 3. 提案手法

#### 3.1 概要

本研究では、仮想物体のパーツをノード、パーツ間の接続をエッジとするグラフに見立て (図 4), 1 章で述べたように、ユーザがあるパーツを持ち上げると、グラフ上で連結しているパーツが徐々に展開され、(1) ゴムメタファに基づいた仮想のゴムの視聴覚 FB をパーツ間に表示することで、パーツ間の接続やその強度の観察を可能とし、(2) これを確認しながら不要なパーツとの間のゴムを切断することで、任意のパーツ群の分解を実現する。

#### 3.2 展開表示するパーツの決定

パーツの展開方法として、1 度にすべてのパーツを展開する手法も考えられるが、ユーザが元の仮想物体の全体像を失念してしまい、分解したい場所が分からなくなってしまう可能性がある。よって本研究では、パーツを把持した手の移動距離  $l_{arm}$  に応じて、展開するパーツを徐々に増やしていく (図 5)。

具体的にはまず、グラフ探索によって、ユーザの把持したパーツ ( $P_0$ ) を起点として各パーツ  $P_n$  ( $0 < n \leq k$ ,  $k$  は  $P_0$  を除く全パーツ数) までのグラフ上の距離  $d_n$  を算出する。次に、 $l_{arm}$  を用いて展開範囲  $d_{exp}$  ( $0 \leq d_{exp} \leq d_{MAX}$  の整数) を算出し、 $d_n \leq d_{exp}$  であるパーツをすべて展開する。ユーザがパーツを持ち替えるたびに、 $P_0$  からグラフ上で最も遠いパーツまでの距離  $d_{MAX}$  を算出し、ユーザが無理なく腕を動かせる上限  $l_{MAX}$  (事前に計測しておく) 以下ですべてのパーツが展開されるように設定する。 $d_{exp}$  は次式で求められる。

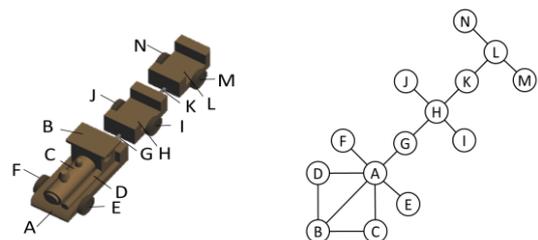
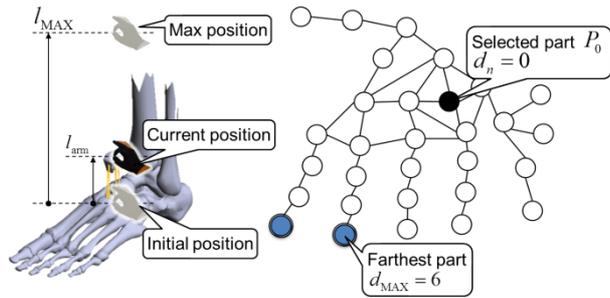
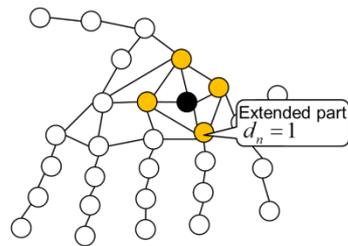


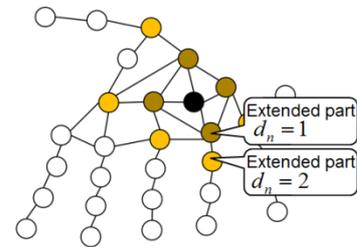
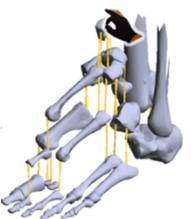
図 4 仮想物体 (左) とパーツ間の接続関係を表すグラフ (右) の例  
Fig. 4 (Left) Example of the virtual object, (Right) the graph that representing the connection between the parts.



(a)  $d_{exp} = 0$



(b)  $d_{exp} = 1$



(c)  $d_{exp} = 2$

図 5 パーツの展開の例

Fig. 5 Part expansion example.

$$d_{exp} = \begin{cases} \left[ \frac{d_{MAX} l_{arm}}{l_{MAX}} \right] & (0 \leq l_{arm} \leq l_{MAX}) \\ d_{MAX} & (l_{MAX} < l_{arm}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、仮想物体全体が移動してしまうことを避けるため、つねに初期位置に固定され、 $d_n$ によらず展開されないパーツ（以降、アンカーパーツと呼称する）が必要である。本システムでは、極力元の形を保ったまま展開可能とするためグラフ上でエッジを1本しか持たないノードに対応するパーツをアンカーパーツとした。

### 3.3 パーツの展開表示

展開したパーツ間には図5の各図における左図に示すように、パーツ間に仮想のゴムの視覚FBを表示する。

実世界における、ゴムでつながった物体の伸展と同様に、パーツの展開方向を手の移動と同じ方向のみにした場合、手の移動方向と直交する方向にはパーツは展開しない(図6)。特に、グラフ上で、把持しているパーツから等距離にあり、互いに接続しているパーツ群は(たとえば、図5(b), (c)における $d_n = 1$ のパーツ)接触したままにな

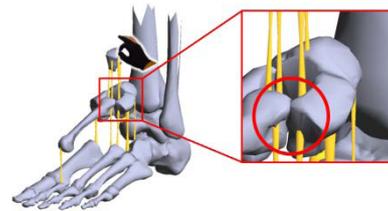


図 6 パーツ間に隙間ができない例

Fig. 6 Example of the no space between the parts.

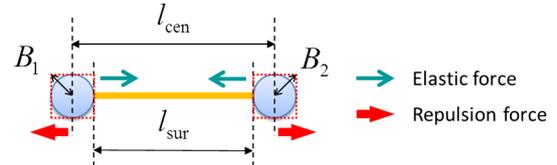


図 7 Force-based アルゴリズム

Fig. 7 Force-based algorithm.

り、パーツ間のゴムが観察できない、切断できないという問題が生じる。

この問題を解決するため本研究では、Force-based アルゴリズム [25] を導入し、パーツ間には互いに作用する反発力  $F_{rep}$ 、エッジで接続されているパーツ間には互いに引き合う弾性力  $F_{ela}$  を割り当て(図7)、力が釣り合うまでパーツ位置の移動と力の計算を行い、全パーツ間の距離を広げる。

まず、弾性力  $F_{ela}$  は、係数  $k_{ela}$ 、各パーツの接続面間の距離  $l_{sur}$  を用いて以下の式で求められる。

$$F_{ela} = k_{ela} l_{sur} \quad (2)$$

ゴムが切断された場合、そのゴムによって加えられていた弾性力は0となる。

Force-based アルゴリズムでは反発力の算出にパーツの中心間の距離のみを用いるため、パーツの大きさによっては、十分に広がらなかつたり、逆に広がりすぎたりすることが考えられる。そのため、本研究ではパーツの大きさも考慮する。反発力  $F_{rep}$  は、係数  $k_{rep}$ 、パーツの中心間の距離  $l_{cen}$ 、また、互いのパーツのバウンディングボックスの大きさ  $B_1$ 、 $B_2$  を用いて以下の式で算出する。

$$F_{rep} = k_{rep} \frac{\log(B_1 + B_2)}{l_{cen}} \quad (3)$$

ここで、各ユーザで必要な反発力の度合いは異なる可能性があるため、ユーザ自身が係数  $k_{rep}$  を調整可能とする。

仮想物体がより複雑になり、パーツ数が多くなると、パーツを把持した手を限界まで移動させ、反発力を働かせても、パーツ間が十分に広がらない場合が考えられる。そこで、他方の手の周囲に、一定の影響範囲を設定し、その範囲内に含まれたパーツに働く弾性力と反発力を変化させることで、局所的にパーツ間を広げる機能を持たせる。

変化後の弾性力  $F_{ela}'$  と反発力  $F_{rep}'$  は重み  $w_{ela}$  と  $w_{rep}$

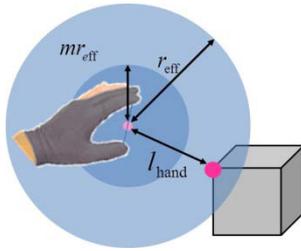


図 8 パーツの局所展開時に用いるパラメータ

Fig. 8 Parameters used for the local expansion of the parts.

を用いて次式で示される.

$$F_{ela}' = w_{ela} F_{ela} \quad (4)$$

$$F_{rep}' = w_{rep} F_{rep} \quad (5)$$

$w_{ela}$  と  $w_{rep}$  の値は次式に示すように、球状の影響範囲の中心（他方の手の、親指と人差し指の midpoint）とパーツとの距離  $l_{hand}$  によって変化する（図 8）.

$$w_{ela} = \begin{cases} 1 & (r_{eff} < l_{hand}) \\ 1 - \frac{l_{hand} - r_{eff}}{mr_{eff} - r_{eff}} E_{min} & (mr_{eff} \leq l_{hand} \leq r_{eff}) \\ 1 - E_{min} & (l_{hand} < mr_{eff}) \end{cases} \quad (6)$$

$$w_{rep} = \begin{cases} 1 & (r_{eff} < l_{hand}) \\ 1 + \frac{l_{hand} - r_{eff}}{mr_{eff} - r_{eff}} R_{MAX} & (mr_{eff} \leq l_{hand} \leq r_{eff}) \\ 1 + R_{MAX} & (l_{hand} < mr_{eff}) \end{cases} \quad (7)$$

$l_{hand}$  が影響範囲の半径  $r_{eff}$  よりも大きいとき、すなわち、パーツが影響範囲外であれば重み  $w_{ela}$  と  $w_{rep}$  はどちらも 1 となり、弾性力・反発力ともに変化しない。 $l_{hand}$  が  $r_{eff}$  より小さいとき、手をパーツに近づけるにつれて、弾性力はより小さく、反発力はより大きくなるため、パーツ間が徐々に広がっていく。しかし、パーツ間が広がり続けると、分解が困難になるため、 $l_{hand}$  が  $mr_{eff}$  ( $0 < m \leq 1$ ) より小さくなったところで、弾性力  $F_{ela}'$  は最小で  $1 - E_{min}$  倍に、反発力は最大で  $1 + R_{MAX}$  倍になるものとし、それ以上広がらないようにする。ここで、 $E_{min}$  は ( $0 < E_{min} \leq 1$ ) をとる弾性力の最小値を決定する値で、値が大きければ大きいほど弾性力は小さくなる。また、 $R_{MAX}$  は ( $0 < R_{MAX}$ ) をとる反発力の最大値を決定する値で、値が大きければ大きいほど反発力は大きくなる。

把持していたパーツを離すと、ゴムの弾性力によって、展開していたパーツは元の位置に戻る。この際、振動の発生を防ぐため、現在展開しているパーツの現在位置と初期位置間の距離がいずれかのパーツで閾値以下になったとき、すべてのパーツの位置を初期位置に戻す。

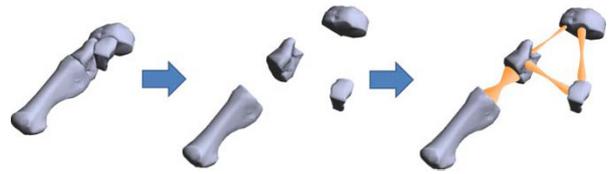


図 9 ゴムの太さによる接続関係の表現

Fig. 9 Displaying the connection strength between parts through elastic band width.

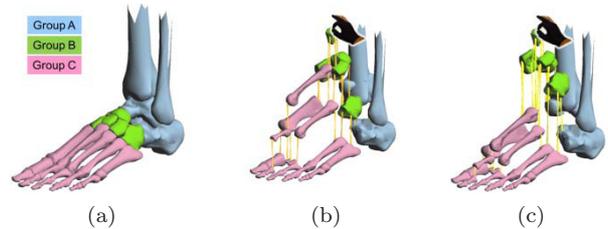


図 10 グループ関係の表現（図では説明のため、明示的に色を付けて表現している）. (a) 足骨を足先、中、かかとの 3 グループに分けた例. (b) 均等に展開した例. (c) グループ関係を考慮して展開した例

Fig. 10 Displaying group relationships (In this figure, groups are color coded for ease of understanding). (a) Grouping of toes, middle of foot and heel. (b) Expanding without taking groups into account. (c) Expanding based on group separation.

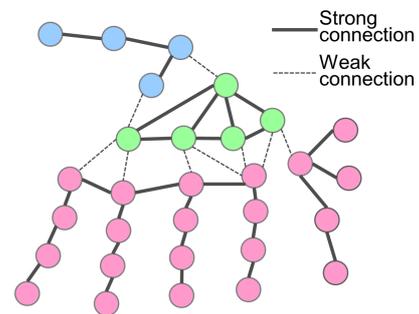


図 11 つながりの強さとグループの設定

Fig. 11 Setting of the connection strength and group.

### 3.4 関係性の表現

パーツを展開した際に表示される仮想のゴムによるパーツどうしの関係性の表現方法について述べる。

まず「どのパーツと接続しているのか」をゴムの有無で、「どの部分が接続しているのか」をゴムの端点で表現する（図 9）。次に、物理的な接続の強さ（例：パーツ間が太いねじで止められている箇所は強い、など）はゴムの太さで表現し、図 10 (a) に示すようなグループの違いによる意味的な接続の強さを、同図 (c) のように、ゴムの伸縮を調整しパーツの位置を変え、同じグループのパーツを凝集させることで表現する。これは、あらかじめ、モデル作成時にどのパーツがどのグループに属しているのかを定義しておき、同じグループのパーツ間ではゴムの弾性力を強く、別のグループであれば弱くすることで実現する（図 11）。

パーツ間で異なるつながりの強さを考慮したゴムの弾性力  $F_{ela}''$  の算出には以下の式を用いる。

$$F_{ela}'' = (k_{ela} + \alpha R)l_{sur} \quad (8)$$

ユーザは調整機能により、係数  $\alpha$  を  $0 \leq \alpha \leq 1$  で調整可能である。  $R$  はパーツ間のつながりの強さを表す係数であり、同じグループのパーツ間では  $R$  を大きく、別のグループでは  $R$  を小さくする。

単純にパーツの色を変えるだけでもグループは表現可能であるが、この機能を用いてグループごとに凝集させた際には、つながりが弱い箇所が大きく広がるため、これを切断すれば、グループ単位でパーツを取り出すことが容易になるという利点がある。

### 3.5 意図した箇所の分解

ユーザが任意のパーツ群を取り出すには、不要なパーツ群との間に表示される仮想のゴムを切断する。本システムでは、ユーザがパーツを把持した手とは逆の手で、伸びたゴムに触れるとゴムが切断され、これを繰り返すことによって分解を行う。パーツ群が2グループ以上に分割された状態で、パーツを把持していた手を放すと分解が終了する(図12)。また、パーツ群が分割されていない状態で手を放すと、展開していたパーツは元の位置に戻り、ゴムの切断はキャンセルされ分解は行われ(図13)。

なお、本機能は3.3節で述べた、パーツを把持していない手による局所展開機能を併用できる。これにより、パーツが密集している場合でも、パーツを把持していない方の手によって部分的にパーツ間を広げながらそのままゴムを切断・分解可能である。

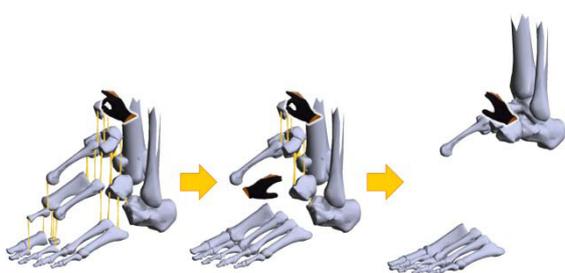


図12 分解までの流れ  
Fig. 12 Ungrouping.



図13 切断の一括キャンセル  
Fig. 13 Undoing of cutting at one time.

## 4. 実装

### 4.1 システム構成

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スルー方式のMRシステムを構築した(図14)。MR空間の管理・構築にはWindows7 OS, Intel Core i7 965 EE 3.20 GHz CPU, 6 GB 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、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) から左目、右目用の各ディスプレイへ出力する。

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。ユーザは、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両手に装着し、また、HMDにも再帰性反射マーカを貼付することで手と指、頭部の3次元位置姿勢を取得可能である。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。開発言語にはC++を、グラフの管理にはBoost Graph Library, グラフィックスAPIにはOpenGLおよびGLUT (OpenGL Utility Toolkit) を用いた。

反発力の係数  $k_{rep}$  とつながりの強さの反映率  $\alpha$  の調整には、SparkFun Electronics社製のFunnel I/Oを用いて可変抵抗からアナログ値を取得しDigi International社製の無線モジュールXBeeを介してソケット通信によってMR空間管理用PCへデータを送受信する。これらの制御プログラムはActionScript3.0を使用している。調整機構の外観と内部構造を図15に、MR空間管理用PCとの通信の流れを図16に示す。本研究では反発力の調整機能をスラ

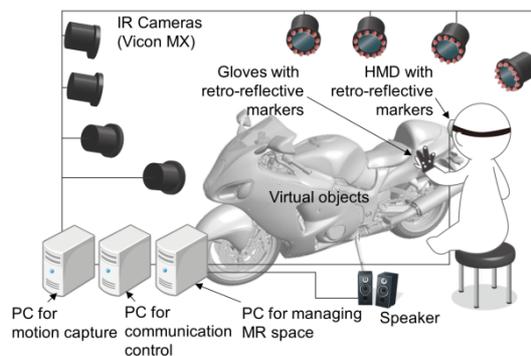


図14 システム構成  
Fig. 14 System configuration.

イダに、つながりの強さの反映率の調整機能をダイヤル式の可変抵抗に割り当てた。これは、手元を見なくても、ユーザが調整機構を触っただけで、どちらの機能なのか把握でき、またその触感によって、どの程度値を変更したのかが分かるようにするためである。パーツを引っ張り上げ、様々な方向に動かしたり、引っ張る距離を調節したりするなどの複雑な操作を、手による三次元操作に、強度の調節というシンプルな操作をスライダ・ダイヤルの物理デバイスに割り当てることで切り分けた。

#### 4.2 聴覚 FB

提案システムでは、前研究 [2] と同様、操作感の向上のために聴覚 FB として

- パーツを把持し、ゴムを引き延ばす際
- ゴムを切断せずにパーツから手を離し、パーツがゴムの力によって元の位置に引き戻される際
- パーツが元の位置に戻り、接続された他のパーツと衝突する際

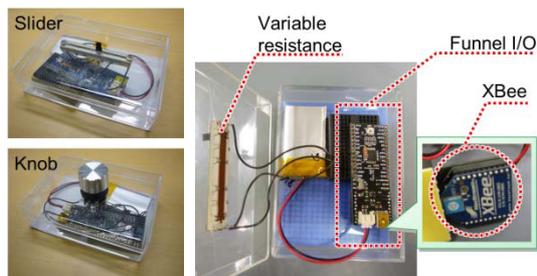


図 15 スライダ/ダイヤルの外観と内部機構

Fig. 15 The looks of slider and knob and its mechanism.

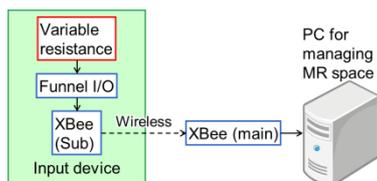


図 16 スライダ/ダイヤルと MR 空間管理用 PC の通信

Fig. 16 Diagram of the communication between the slider/knob component and PC for managing MR space.

- 伸ばしたゴムを切断した際にそれぞれスピーカより「グググ…」「ヒュッ」「カチッ」「プツン」という音を提示した。

#### 4.3 パーツの把持ジェスチャ

パーツを把持するジェスチャの処理を以下に述べる。

- 親指の 3 次元位置  $\mathbf{p}_{Thu}$  と人指し指の 3 次元位置  $\mathbf{p}_{Ind}$  を結ぶ線分  $\mathbf{p}_{Ind}\mathbf{p}_{Thu}$  を、パーツのポリゴンと交差させることで、そのパーツを選択する (図 17 (a))
- $|\mathbf{p}_{Ind} - \mathbf{p}_{Thu}|$  を閾値  $L_{Pin}$  以下まで狭める ( $|\mathbf{p}_{Thu} - \mathbf{p}_{Ind}| < L_{Pin}$ ) ことで、選択されているパーツを把持することができる (同図 (b))

なお、 $\mathbf{p}_{Ind}\mathbf{p}_{Thu}$  上に複数のポリゴンが存在した場合、 $\mathbf{p}_{Thu}$  と  $\mathbf{p}_{Ind}$  の中点  $\mathbf{p}_{Cen}$  に最も近いポリゴンを含むパーツのみが把持の対象となる。

このとき、視覚 FB として、選択されたパーツの色を変化させる。さらに、把持状態にすると別の色に変化させる。

#### 4.4 実装結果

図 18 に足骨の仮想物体を用い、反発力  $k_{rep}$  を 0 としてパーツ群を展開させた様子を示す。パーツを把持した手の移動距離に応じて、展開するパーツ数が増えていることが分かる。図 19 は反発力の大きさによる展開の程度の違いを示している。反発力を増加させることによって、図 18 では隙間のなかったパーツ間も広がっている。図 20 に局所的にパーツ間を広げたときの様子を示す。手の付近に表示されている半透明の球が影響範囲である。影響範囲に入っ

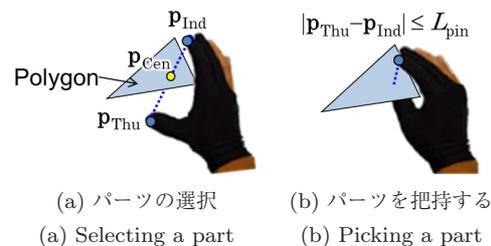


図 17 “Picking” gesture.

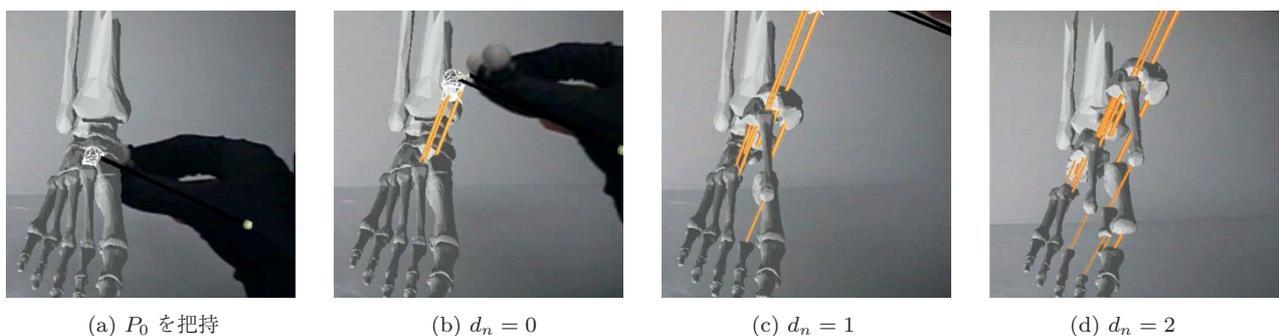


図 18 段階的なパーツの展開

Fig. 18 Gradually expansion of the parts.

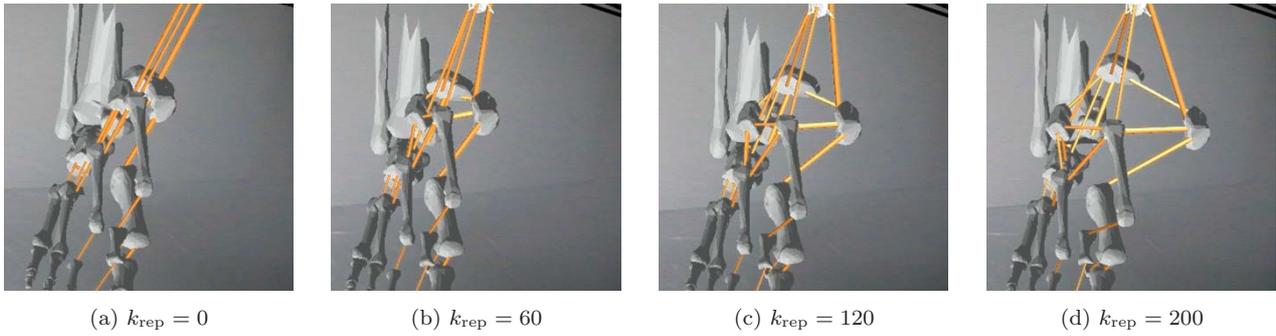
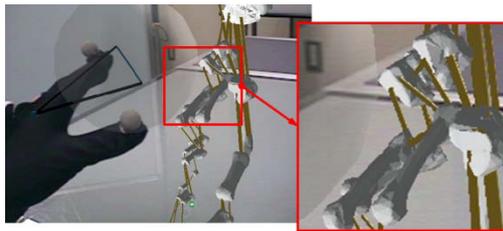
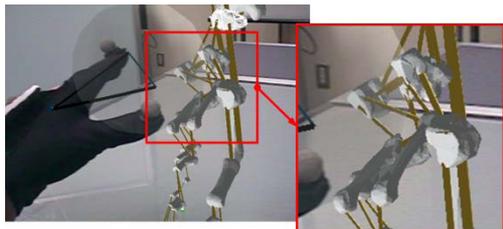


図 19 反発力による展開の違い

Fig. 19 Expansion according to different repulsion forces.

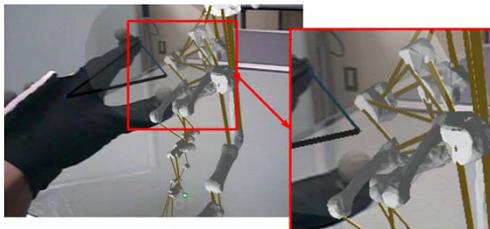


(a) パーツが影響範囲外 ( $l_{hand} > r_{eff}$ ) にある場合  
(a) When the parts are out of the effective area ( $l_{hand} > r_{eff}$ ).



(b) パーツが影響範囲内にあり、パーツ間が徐々に広がっている場合  
( $r_{eff} \geq l_{hand} > mr_{eff}$ )

(b) When the parts are in the effective area  
( $r_{eff} \geq l_{hand} > mr_{eff}$ ), they expand gradually.



(c) パーツが影響範囲内にあり、パーツ間が最大限に広がっている場合  
( $mr_{eff} \geq l_{hand}$ )

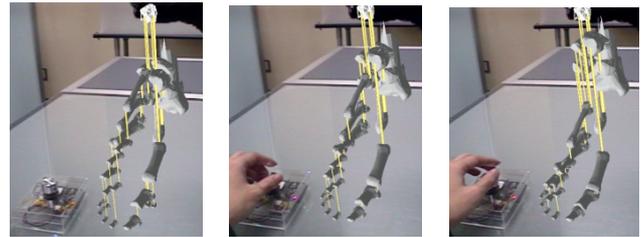
(c) When the parts are in the effective area  
( $mr_{eff} \geq l_{hand}$ ), they expand fully.

図 20 局所的にパーツ間が広がる様子

Fig. 20 Expanding the parts locally.

たパーツどうしの間隔が広がり、さらに手を近づけたときにはより広がっていることが分かる。

図 21 に、ゴムの伸縮によってグループ関係を表したものを示す。同図 (c) ではつながりの強さが最大までゴムの弾性力に反映されており、グループごとにパーツがまと



(a)  $\alpha = 0$  (b)  $\alpha = 0.5$  (c)  $\alpha = 1$

図 21 反映率  $\alpha$  に応じたグループ関係の表現

Fig. 21 Difference in representation of groups depending on the value of coherence  $\alpha$ .

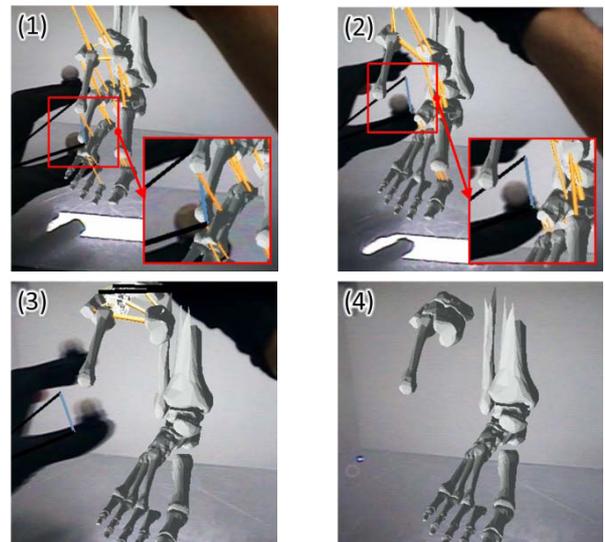


図 22 ゴムの切断

Fig. 22 Cutting rubbers.

まっていることが分かる。

図 22 にゴムを切断して分解を行っている様子を示す。

## 5. 運用

### 5.1 概要

足骨の仮想物体 (パーツ数 30, エッジ数 35, 総ポリゴン数 15,276, 平均実行速度 54.6 fps) を用い、体験者 8 名 (男性 8 名, 21 歳~22 歳) に椅子に着席させた状態で、パーツ・グループの観察・分解を行わせ、提案手法による展開・

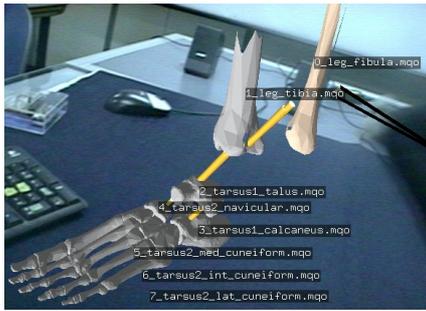


図 23 展開されたパーツのラベル表示

Fig. 23 Displaying the labels of the expanded parts.

表 1 実験条件

Table 1 Experimental conditions.

| 実験 # | 1      |     | 2   |     | 3   |     | 4   |     |
|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | 1      | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   |
| 展開方法 | 自動     | 任意  |
| 機能   | 反発力調整  | OFF | OFF | OFF | 任意  | OFF | OFF | OFF |
|      | 局所展開   | OFF | OFF | OFF | OFF | OFF | 任意  | OFF |
|      | グループ展開 | OFF |

切断機能, スライダによるパーツ間の反発力の調整機能, パーツを把持しない方の手による局所展開機能, グループ展開機能の有用性を確認した.

すべてのパーツはグループ分けされ, 個別に名前が付けられており, パーツを展開すると「番号\_グループ名\_パーツ名」の形式で各パーツの名前がラベルとして表示される(図 23). なお, ラベルは文献 [26] のアルゴリズムを用いて, 互いが重ならないように配置した.

ターゲットパーツ・グループは事前に予備実験によって決定し, 各試行で重複のないようにし, 試行ごとに実験者が名前を読み上げて指示した. 実験中は操作時間と操作内容を記録した.

なお, 予備実験において, グループ展開機能の強度の調整機能について「微調整などの必要がないので, スイッチでもよい」と回答する被験者が多かったため, スイッチによって ON/OFF の切替えのみ可能にした(式 (8) の係数  $\alpha$  を 0 か 1 のみに固定). 局所展開機能については図 20 同様, 半透明の白色の仮想球で影響範囲を示した.

表 1 に, 各実験における条件を示す. 全体験者とも実験 1 から 4 の順に実施し, 条件 1, 2 の実施順番は体験者ごとに異なるようにした. 全体験者は, 事前に練習用モデル(図 24)を用いて体験者が十分と感じるまで練習をさせ, 「複雑な仮想物体のどのパーツがどこにあるのか, どんなパーツとつながっているのかなど, その構造を観察・分解しながら学ぶようなシーン」を想定して各タスクを実施するよう説明した. また, 実験中は自由に発言させた.

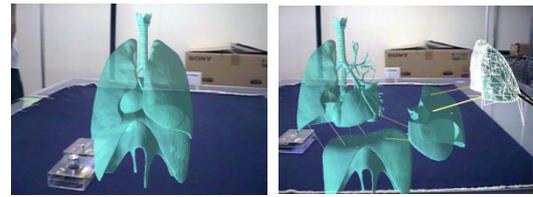


図 24 操作練習用に作成した肺と心臓モデル

Fig. 24 Lung & heart model for practice.

## 5.2 実験内容

### 5.2.1 実験 1: 提案手法による展開・切断手法の有用性の確認

体験者には以下のタスクを課した.

観察タスク: ターゲットパーツに接続しているパーツの名称を回答させる.

分解タスク: ターゲットパーツのみを取り出す.

各タスクにおいて, 以下の 2 条件を体験, 比較させた.

条件 1: ターゲットパーツが元の状態でどこにあるかを把握させた後, 実験者のキーの押下によって全体を自動的に展開させる. 反発力は事前に予備実験によって設定した固定値とし, スライダによる調整は行わない.

条件 2: 体験者に任意のパーツを把持させ, 徐々に展開させる. パーツ間の反発力は固定値とし, スライダによる調整は OFF とする.

体験後に以下の質問に 5 段階で回答させた.

Q1 観察について, 条件 1 と条件 2 を比較してどちらが有用であったか (1: 条件 1 の方が良い, 5: 条件 2 の方が良い)

Q2 分解について, 条件 1 と条件 2 を比較してどちらが有用であったか (1: 条件 1 の方が良い, 5: 条件 2 の方が良い)

Q3 条件 2 はゴムメタファとして違和感がないか (1: 違和感がある, 5: 違和感はない)

### 5.2.2 実験 2: スライダによるパーツ間の反発力の調整機能の有用性の確認

体験者に課したタスクは実験 1 と同様であり, 各タスクにおいて以下の 2 条件を体験, 比較させた.

条件 1: パーツ間の反発力は固定値とし, スライダによる調整は OFF とする.

条件 2: スライダによるパーツ間の反発力の調整を体験者自身が行う.

体験後の質問は実験 1 の Q 1, Q 2 と同様である.

### 5.2.3 実験 3: 他方の手による局所展開機能の有用性の確認

体験者に課したタスクは実験 1 と同様であり, 各タスクにおいて以下の 2 条件を体験, 比較させた.

条件 1: パーツ間の反発力は固定値とし, 局所展開機能は OFF とする.

条件 2: 局所展開機能のみ ON/OFF を体験者に自由に

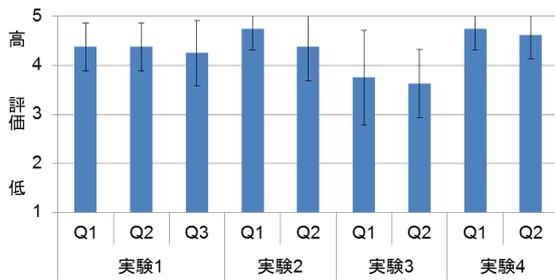


図 25 実験結果：5 段階評価

Fig. 25 Experiment results: 5 point scale evaluation.

切り替えさせる。

体験後の質問は実験 1 の Q 1, Q 2 と同様である。

#### 5.2.4 実験 4：グループ展開機能の有用性の確認

パーツ間の接続の強さを図 11 に示したものと同様に 2 段階に設定した足骨モデルを用い、体験者に以下のタスクを課した。

**観察タスク：**ターゲットグループに属するパーツの数を回答させる。

**分解タスク：**ターゲットグループのみを取り出す。

タスク実施において以下の 2 条件を体験、比較させた。

**条件 1：**パーツ間の反発力は固定値とし、スライダによる調整機能、局所展開機能、グループ展開機能はすべて OFF とする。

**条件 2：**グループ展開機能のみ ON/OFF を体験者に自由に切り替えさせる。

体験後の質問は実験 1 の Q 1, Q 2 と同様である。

### 5.3 実験結果

5 段階評価の実験結果を図 25 に示す。いずれの項目も高い評価を得た。

#### 【提案手法による展開・切断機能】

一度に展開する条件 1 に比べ、条件 2 の提案手法では体験者自身が展開量やパーツ位置を調整できるため、パーツの元の場所も把握しやすく、観察が容易であるという意見が得られた。また、注目したいところを中心に展開できる点も好意的な評価につながった。

分解についても、提案手法では体験者自身が操作できるため、分解に必要なゴムだけを的確に切断できる、切りたいところを引き延ばすことができるため切断しやすい、というコメントが得られた。

ゴムとして違和感がないかどうかについては、8 名中 7 名の体験者が 4 点以上を付け、違和感はないと回答した。その理由として聴覚 FB によってゴムらしさが伝わるというコメントが得られた。一方、1 名からのみ、ゴム特有の抵抗が感じられない、という意見があった。

#### 【スライダによるパーツ間の反発力の調整機能】

観察・分解タスクともに、自分の好みに応じた量・タイミングで微調整ができるため有用である、というコメント

を得た。また、操作内容のログを見ても、設定された反発力の大きさや、スライダを動かす速度は体験者ごとにまちまちであったため、スライダによる調整機能は有用であったといえる。その一方で、ボタン 1 つで 1 度に展開できる方が効率が良いというコメントも 1 名の体験者から得られた。これについては、プリセットとして固定値を設定しておくといった改良が考えられる。

#### 【パーツを把持しない方の手による局所展開機能】

観察においては、自分の意図した箇所・注目している箇所のみを広げられる点や、局所的にパーツ間を広げられるため、把持したパーツを大きく動かす必要がなくなる点について好意的な評価が得られた。その一方で、最初に把持し、展開するパーツによっては局所展開機能を使わなくても観察、分解できる場合があり、他の機能に比べて低い評価になった。

3.5 節で述べたとおり、本機能は広げながら切るという使い方を想定して実装し、8 名中 4 名がこれについて言及し、分解が容易になるとコメントしていた。しかし、観察においては、意図せずゴムを切断してしまうことがあり、観察タスクにおける評価を下げる原因となった。この問題を回避するため、局所展開機能と切断ジェスチャを分けるトリガが必要である。

#### 【グループ展開機能】

全員が、グループ単位でパーツ群を観察・分解する際に分かりやすくなる、間のゴムを切断しやすくなる、と回答した。しかし、パーツ間に働く反発力が十分でない場合は、同じグループのパーツが十分に凝集しないこともあった。これについてはグループ展開機能を ON にした場合は反発力を自動的に増加させるといった改良が考えられる。

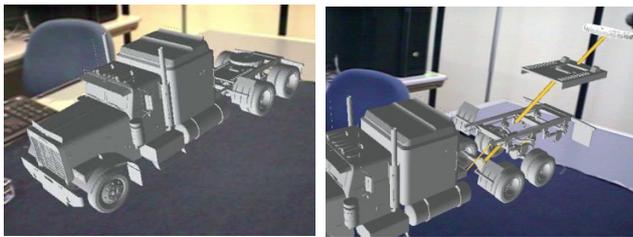
## 6. 他の仮想物体への適用

前章で用いた足骨以外（顕微鏡、トラック、肺・心臓）の仮想物体に提案手法を適用した例を図 26 に示す（肺・心臓は図 24）。表 2 には各仮想物体のパーツ数、エッジ数、総ポリゴン数、平均実行速度を fps で示している。

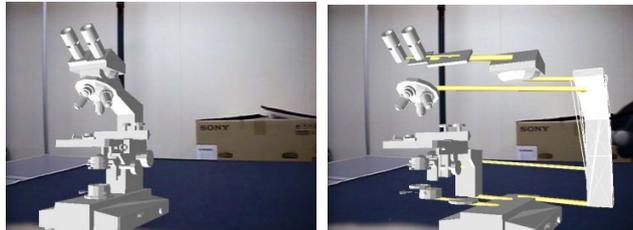
(1) 実行速度：概して総ポリゴン数に依存していると考えられる。4.1 節のシステム構成ではエッジ数、パーツ数ともに 30 程度まで増やしても、総ポリゴン数が 6 万程度までであればストレスなく動作していた。

(2) パーツの展開：顕微鏡モデルのように、薄くて小さいパーツが重なっていて、直接選択が困難な場合に、まずそれに接続している比較的大きなパーツを選択、展開することで、観察可能であった。特に、視認ができないパーツに対して有効であった。

(3) パーツ展開時における反発力の適用および局所的な展開：すべてのモデルについて有用であった。特に後者は、顕微鏡モデルのように細かいパーツが多数含まれる場合に有効であり、いろいろな箇所を次々に展開し、観察できる



(a) トラック  
(a) Truck



(b) 顕微鏡  
(b) Microscope

図 26 様々な仮想物体に提案手法を適用した例  
Fig. 26 Test cases.

表 2 各仮想物体のパーツ数, エッジ数, ポリゴン数, 平均 fps  
Table 2 Parts, edge, polygon numbers, and average fps of each virtual object.

|                | Parts # | Edge # | Polygon # | Ave. fps |
|----------------|---------|--------|-----------|----------|
| Foot bone      | 30      | 35     | 15,276    | 54.6     |
| Microscope     | 34      | 35     | 7,984     | 57.5     |
| Truck          | 29      | 29     | 62,958    | 32.7     |
| Lung and heart | 12      | 13     | 279,859   | 9.0      |

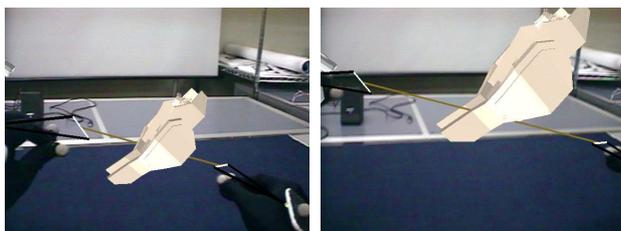


図 27 両手ジェスチャによる拡大縮小機能  
Fig. 27 “Scaling” by both hand gesture.

という利点があった。しかし、その一方でパーツどうしが密集しているため僅かな手の動きによって展開箇所が変化してしまい、目的の箇所をつねに広げておくのが難しいことや、意図せずに分解してしまうこともあった。これについては仮想物体全体を拡大・縮小する機能を実装し、部分的な分解と併用することで改善を試みた。ここでは、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、両手の距離を広げたり狭めたりするジェスチャによる拡大縮小機能を実現した (図 27)。

(4) パーツ展開時における観察と分解：顕微鏡およびトラックモデルは足骨に比べ困難であった。その理由として、こ

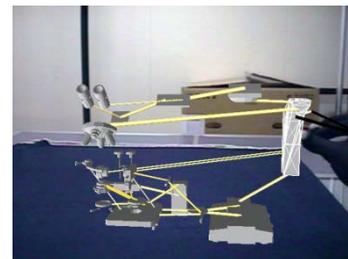


図 28 細かいパーツ群に対して反発力を大きくした結果、見た目が大きく変化した。多数のパーツやエッジが交差している例 (顕微鏡モデル)

Fig. 28 A large repulsion force drastically changes the look of the microscope. Many parts and edges overlap each other.

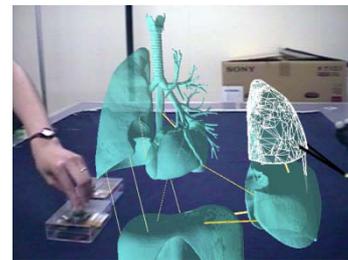


図 29 グループ関係を反映した例 (肺と心臓モデル)

Fig. 29 Lungs and heart example displaying object grouping.

これらのモデルは、足骨に比べてアンカーパーツが多く互いに密集しているため、展開しても各パーツが広がるスペースが制限されている (図 28) ことや、立体的に密集した構造であることから、展開しているパーツが増加すると、エッジやパーツの交差が多数生じてしまうことがあげられる。一方、肺のモデルについては各パーツの大きさが比較的大きく、エッジの位置も互いに離れているため、この問題は生じなかった。

この問題については、分解前にアンカーパーツを移動させることで解決を図った。具体的には、パーツを展開していないときに、パーツを展開するのとは逆の手を用いて、パーツを個別に移動させる機能を追加した。これによって、肺と心臓モデルのように、内部のパーツが外側のパーツによって隠蔽されている場合でもあらかじめ外側のパーツを移動させておくことで、容易に選択可能になった。

また、今回の実装では「グラフ上でエッジを1本しか持たないノードに対応するパーツ」をアンカーパーツとしたが、今後の発展として、ユーザ自身が元の形状が把握できる範囲で任意のパーツをアンカーパーツとして固定したり、固定を解除したりするインタラクションを実装したりすることも考えられる。

(5) グループ関係の表現：すべてのモデルにおいてグループ単位でパーツ群を分解する際に有用であった。図 29 に肺と心臓モデルのグループ関係を反映した例を示す。

## 7. 結論

本研究では、MR空間において、多数のパーツから構成される仮想物体の観察と分解手法について検討した。提案システムではジェスチャ操作を取り入れ、操作感を向上させるゴムメタファを活用し、(1) パーツ間の関係性を表現し、観察可能にする手法、(2) ユーザの意図したパーツ群を分解する手法を提案した。

提案手法では各パーツをノード、パーツ間の接続関係をエッジとするグラフに見立て、その接続関係をゴムメタファによって表現した。ユーザが任意のパーツ群を部分的に引き出して展開すると、パーツ間に仮想のゴムが表示される。(1)については、パーツの「接続関係」をゴムの有無や端点、太さで表現した。また「グループ関係」についてはパーツ間のゴムの弾性力の変更によってパーツどうしが凝集することで表現した。(2)については必要なパーツ群と不要なパーツ群との間のゴムを切断することで実現した。

さらに、パーツの展開時に、パーツ間に働く反発力と弾性力の導入、およびそれらの値の局所的な変更、反発力の調整機能により、観察・分解操作をより容易に、かつ正確に行えるようにした。

以上を実装し運用した結果、提案手法は、複雑な3D仮想物体の分解において、ユーザがパーツ間の接続を観察し、意図したパーツを分解して取り出すのに有効である、という良好な結果を得た。また、いくつかの応用例も作成し、問題点とその解決法について議論した。

本研究では、MRシステムを用いて実装を行ったが、他の3D仮想物体を扱うシステム、たとえば、VRシステムはもちろん、マウスやマルチタッチディスプレイを用いることで、既存のCADシステムにも適用できると考えられる。今後は、これらのシステムに適用し、その違いの比較や、環境の違いに応じたインタラクションの改良を行うことを検討している。

## 参考文献

- [1] Krüger, W., Bohn, C.A., Fröhlich, B., Schüth, H., Strauss, W. and Wesche, G.: The Responsive Workbench, *IEEE Computer*, Vol.28, No.7, pp.42-48 (1995).
- [2] Otsuki, M., Oshita, T., Kimura, A., Shibata, F. and Tamura, H.: Touch & Detach: Ungrouping and observation methods for complex virtual objects using an elastic metaphor, *Proc. IEEE Symp. on 3D User Interfaces 2013*, pp.99-106 (2013).
- [3] Sielhorst, T., Bichlmeier, C., Heining, S.M. and Navab, N.: Depth perception a major issue in medical AR: Evaluation study by twenty surgeons, *Proc. MICCAI 2006*, pp.364-372 (2006).
- [4] Elmqvist, N., Assarsson, U. and Tsigas, P.: Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: Design issues and evaluation, *Proc. INTERACT 2007*, pp.532-545 (2007).
- [5] Li, W., Agrawala, M., Curless, B. and Salesin, D.: Au-

- tomated generation of interactive 3D exploded view diagrams, *ACM Trans. Graphics*, Vol.27, No.3, Article 101 (2008).
- [6] Shiozawa, H.: WWW visualization giving meanings to interactive manipulations, *Proc. Int'l Conf. Human-Computer Interaction '97*, pp.791-794 (1997).
- [7] Bowman, D.A., Kruijff, E., LaViola, J.J. and Poupyrev, I.: *3D user interfaces: Theory and practice*, Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA (2004).
- [8] Mine, M., Frederick, J., Brooks, P. and Sequin, C.H.: Moving objects in space: Exploiting proprioception in virtual-environment interaction, *Proc. SIGGRAPH '97*, pp.19-26 (1997).
- [9] Poupyrev, I., Billinghamst, M., Weghorst, S. and Ichikawa, T.: The Go-Go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in VR, *Proc. UIST 1996*, pp.79-80 (1996).
- [10] Bowman, D.A. and Hodges, L.F.: An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments, *Proc. Symp. Interactive 3D Graphics*, pp.35-38 (1997).
- [11] Grossman, T. and Balakrishnan, R.: The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays, *Proc. UIST 2006*, pp.3-12 (2006).
- [12] Olwal, A. and Feiner, S.: The Flexible Pointer - An interaction technique for selection in augmented and virtual reality, *Conf. Suppl. UIST 2003*, pp.81-82 (2003).
- [13] Liang, J. and Green, M.: JDCAD: A highly interactive 3D modeling system, *Computers and Graphics*, Vol.18, No.4, pp.499-506 (1994).
- [14] Steed, A. and Parker, C.: 3D selection strategies for head tracked and non-head tracked operation of spatially immersive displays, *8th Int'l Immersive Projection Technology Workshop* (2004).
- [15] Wyss, H.P., Blach, R. and Bues, M.: iSith - Intersection-based spatial interaction for two hands, *Proc. 3DUI 2006*, pp.59-61 (2006).
- [16] Kopper, R., Bacim, F. and Bowman, D.A.: Rapid and accurate 3D selection by progressive refinement, *Proc. 3DUI '11*, pp.67-74 (2011).
- [17] Stoakley, R., Conway, M.J. and Pausch, R.: Virtual reality on a WIM: Interactive worlds in miniature, *Proc. CHI 1995*, pp.265-272 (1995).
- [18] Pierce, J.S., Stearns, B.C. and Pausch, R.: Voodoo dolls: Seamless interaction at multiple scales in virtual environments, *Proc. I3D '99*, pp.141-145 (1999).
- [19] Schmalstieg, D., Encarnação, L. and Szalavári, Z.: Using transparent props for interaction with the virtual table, *Proc. I3D '99*, pp.147-153 (1999).
- [20] Schmidt, G., Baillet, Y., Brown, D.G., Tomlin, E.B. and Swan, J.E.: Toward disambiguating multiple selections for frustum-based pointing, *Proc. 3DUI 2006*, pp.87-94 (2006).
- [21] Ohnishi, T., Lindeman, R. and Kiyokawa, K.: Multiple multi-touch touchpads for 3D selection, *Proc. 3DUI 2011*, pp.115-116 (2011).
- [22] Haan, G., Koutek, M. and Post, F.: Towards intuitive exploration tools for data visualization in VR, *Proc. VRST 2002*, pp.105-112 (2002).
- [23] Stuerzlinger, W. and Smith, G.: Efficient manipulation of object groups in virtual environments, *Proc. IEEE VR 2002*, pp.251-258 (2002).
- [24] Oh, J.Y., Stuerzlinger, W. and Dadgari, D.: Group selection techniques for efficient 3D modeling, *Proc.*

3DUI 2006, pp.95-102 (2006).

- [25] Eades, P.: A heuristic for graph drawing, *Congressus Numerantium*, Vol.42, pp.149-160 (1984).
- [26] Shibata, F., Hashimoto, T., Furuno, K., Kimura, A. and Tamura, H.: Scalable architecture and content description language for mobile mixed reality systems, *Proc. ICAT 2006*, pp.122-131 (2006).



大槻 麻衣 (正会員)

2006年立命館大学理工学部情報学科卒業。2011年同大学院理工学研究科博士後期課程修了。2008年より2011年まで学振・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。2012年3月より

2013年3月まで University of Toronto, Visitor post-doc student. 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。日本 VR 学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM, IEEE 各会員。2009年日本 VR 学会論文賞, 2013年ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。



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業。2013年同大学院博士前期課程修了。同年4月より株式会社日立製作所。2010年より2013年まで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。



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。現在, 同教授。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。電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本 VR 学会, ACM, IEEE 各会員。日本 VR 学会学術奨励賞・論文賞, ヒューマンインタフェース学会論文賞, 本学会山下記念研究賞等受賞。



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, 同大学情報理工学部情報コミュニケーション

学科教授。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 VR 学会等の会員。日本 VR 学会学術奨励賞・論文賞を受賞。



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年立命館大学理工学部教授。現在, 同総合科学技術研究機構教授。工学博士。画像情報処理, マルチメディア, パーチャル

リアリティ等の研究推進と実用化に従事。編著書『Mixed Reality』(Ohmsha & Springer), 『コンピュータ画像処理』(オーム社)等。電子情報通信学会および日本 VR 学会フェロー, IEEE, ACM, 映像情報メディア学会等の会員。本学会および VR 学会論文賞, 人工知能学会功労賞等を受賞。