

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号： 1 2 2 0 1  
研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）  
研究期間： 2017～2019  
課題番号： 1 6 K K 0 0 0 1  
研究課題名（和文）柔軟仮想物体を対象とした素手によるARインタラクションの実現（国際共同研究強化）  
  
研究課題名（英文）A Study on Perception of Grasping a Virtual Soft Object with a Bare Hand  
(Fostering Joint International Research)  
  
研究代表者  
佐藤 美恵 (Sato, Mie)  
  
宇都宮大学・工学部・教授  
  
研究者番号： 0 0 3 4 4 9 0 3  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,100,000 円  
渡航期間： 12 ヶ月

研究成果の概要（和文）：ヘッドマウントディスプレイ上に描画された仮想物体を、触覚提示デバイスを用いずに、現実世界でまさにユーザの目の前にある物体を扱うかのように、素手で掴み操れる、拡張現実感（Augmented Reality、以下「AR」）を用いたインタラクション技術が開発されている。本研究では、素手によりインタラクションが行える仮想物体の形状や性質の適用範囲を拡大するために、より複雑な計算を必要とする柔軟仮想物体を素手で掴み操れるARインタラクションを実現した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、素手によるARインタラクションの適用範囲を柔軟仮想物体まで拡大できた。これは、現実空間と仮想空間を統合したインターネットショッピングやシミュレーション、さらには遠隔地にいるユーザが仮想空間を共有して互いの手の柔らかさを擬似的に感じられるようなARコミュニケーションの発展に繋がるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We have been studying on interaction techniques using Augmented Reality (AR) and developing an AR system that allows a user to grasp a virtual object with a bare hand. This study extended the target of our AR system to a virtual soft object that needed more complicated computation than a virtual hard object.

研究分野： 感性情報学

キーワード： 拡張現実感 感性情報処理

## 1. 研究開始当初の背景

拡張現実感 (Augmented Reality、以下「AR」) とは、人が知覚する現実環境をコンピュータにより拡張する技術である。ここ数年の間に、AR 技術開発に必要なハードウェアの性能向上や各種センサの普及が急速に進み、AR は視覚情報による現実環境の拡張だけでなく、その可能性を広げ、その中でも AR を用いたインタラクション「AR インタラクション」が注目されている。

私たちは、これまで、ヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Display、以下「HMD」) 上に描画された 3 次元物体を、AR マーカやデータグローブなどの装着型触覚提示デバイスを用いずに、現実世界でまさにユーザの目の前にある物体を扱うかのように、素手で掴み操れる、AR インタラクションを研究している。この AR インタラクションの特徴は、素手による仮想物体との自然なインタラクションである。素手による仮想物体との自然なインタラクションを実現するためには、仮想世界と現実世界を高精度に整合し、ユーザが素手で仮想物体を掴み操る際の手と仮想物体の形状、質感、動きを違和感なく提示し、触覚フィードバックの代替として、視覚、聴覚、そしてこれらの感覚間相互作用によりユーザに疑似的な触感を錯覚させる必要がある。

## 2. 研究の目的

私たちは、すでに、素手による掴み動作に着目した立体視可能な AR システムを開発している。本 AR システムでは、ステレオカメラから得られる手情報を実時間処理し、HMD 上の仮想世界と整合することで、HMD を通して、ユーザに自分の親指と人差し指で立体表示された仮想物体を掴む視覚的体験を提供している。

本研究では、本 AR システムを用いて、素手によりインタラクションが行える仮想物体の形状や性質の適用範囲を拡大するために、より複雑な計算を必要とする柔軟仮想物体を素手で掴み操れる AR インタラクションを実現する。

## 3. 研究の方法

本研究では、柔軟仮想物体の視覚的表現と疑似的な触覚提示に有効な聴覚刺激を実験により調査した。

### (1) 指先の移動情報に基づき聴覚刺激を提示する AR システム

図 1 に本 AR システム全体の構成を示す。本システムは、PC(CPU:4.0GHz Intel core i7-4790K, RAM:16GB)、HMD(Oculus Rift DK2, OculusVR)、ステレオ RGB カメラ(Ovrvision Pro, Wizapply)、ヘッドホン(ATH-M20x, audio-technica)及びポジショントラッキングカメラ(HMD の付属品)から構成される。ユーザはステレオ RGB カメラの取り付けられた HMD とヘッドホンを装着し、仮想物体とのインタラクションを行う。

以下に、本 AR システムの処理手順を示す。

- Step1: ステレオ RGB カメラから取得した画像から、指先の 3 次元座標を取得する。
- Step2: 取得した指先と仮想物体の位置関係により、仮想物体の掴み判定を行う。
- Step3: 掴んでいると判定された場合、以下の処理を並列に行う。
  - ・指先間の距離に基づき仮想物体を变形し、指先が仮想物体の芯よりも内側に入った場合は、指先が仮想物体の表面に接しているように手形状を補正する。
  - ・指先の移動情報に基づき聴覚刺激を提示する。
  - ・仮想物体と指の位置関係に基づき陰面処理を行う。

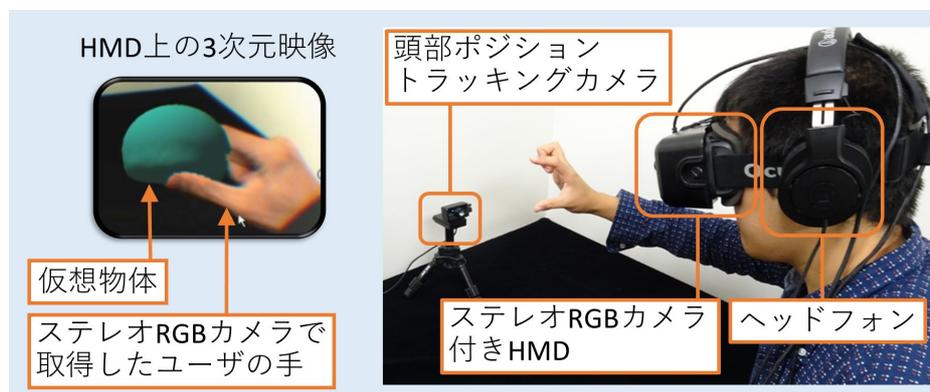


図 1：指先の移動情報に基づき聴覚刺激を提示する AR システム

## (2) 「掴み音」と「放し音」による聴覚刺激と仮想物体の擬似的な柔らかさ知覚

### 聴覚刺激の選定

聴覚刺激は、仮想物体を掴んでいる間に提示する「掴み音」と、仮想物体から指を離した際に提示する「放し音」とし、2つの音は周波数の異なるピープ音とした。本研究では、関連研究でユーザに「決定」の印象を与える可能性があると考えられ、1音目から2音目にかけてピッチが下がる長3度、完全4度のサイン音から聴覚刺激を用意した。表1に用意した聴覚刺激を示す。

提示時間は、掴み音は仮想物体を掴んでいる間は提示され続け、放し音は指を離してから150msとした。また、音量は指先の仮想物体の中心方向への速度に合わせて変化させ、速度が速ければ音が大きく、遅ければ小さくなるように提示した。

表1：聴覚刺激（「掴み音」と「放し音」）

度数	掴み音		放し音 [150 ms]	
長3度	C6	1047 Hz	G#5	831 Hz
完全4度	C6	1047 Hz	G5	784 Hz
長3度	C5	523 Hz	G#4	415 Hz
完全4度	C5	523 Hz	G4	392 Hz

### 「掴み音」と「放し音」を付加した仮想物体の柔らかさ知覚と操作性に関する実験

本研究では、「掴み音」と「放し音」の付加が仮想物体の柔らかさ知覚と操作性を向上できるかを調べるために、印象評価実験を行った。

実験刺激としては、視覚刺激は3種類の柔らかさの仮想物体（直径10cmの球）であり、聴覚刺激は表1に示した4種類である。被験者には、聴覚刺激が異なる同じ柔らかさの仮想物体を比較してもらった。なお、視覚刺激の提示順と、同じ視覚刺激に対する聴覚刺激の提示順はそれぞれランダムとした。

実験手順は、視覚刺激が同一で聴覚刺激が異なる2つの仮想物体に対して、仮想物体を掴み、柔らかさを確かめ、指定の位置に移動させ、放すという動作を行ってもらった。その後、2つの仮想物体を比較し、以下の質問項目Q1～Q5に、提示した仮想物体を順番にA、Bとし、「1. A」、「2. どちらかといえばA」、「3. どちらかといえばB」、「4. B」の4段階で回答してもらった。

- Q1: より柔らかいと感じた仮想物体はどちらか。
- Q2: より持っていると感じた仮想物体はどちらか。
- Q3: より動かしやすいと感じた仮想物体はどちらか。
- Q4: より重いと感じた仮想物体はどちらか。
- Q5: より掴みやすいと感じた仮想物体はどちらか。

以上を1施行とし、視覚刺激1種類に対して聴覚刺激の組み合わせが6組あるため、全試行数は360回（視覚刺激3種類×聴覚刺激6組×被験者20人）となった。

## (3) 芯部分での音量変化による聴覚刺激と仮想物体の擬似的な柔らかさ知覚

### 聴覚刺激の選定

実物体で存在する“潰せる限界の位置”を仮想物体でも知覚させるため、仮想物体の芯部分に着目する。

聴覚刺激は、ユーザの指先間の距離が短くなるにつれて音量が大きくなり、ユーザの指先が仮想物体の芯部分に達したときに、さらに音量変化を加えたピープ音とした。図2に選定した聴覚刺激を示す。仮想物体の芯部分で加えた音量変化は、予備実験の結果に基づき、「芯部分前までと同じ連続変化（上昇）（図2(A)）」、「不連続変化（大きく上昇、大きく下降）（図2(B)）」、「連続変化（大きく上昇、大きく下降）（図2(C)）」、「音なし（図2(D)）」を用意した。

聴覚刺激の周波数は、前節から「より柔らかい」という傾向が得られた聴覚刺激の「掴み音」で用いられた523Hzとした。

### 芯部分での音量変化を付加した仮想物体の柔らかさ知覚に関する実験

本研究では、仮想物体の芯部分での音量変化の付加が仮想物体の柔らかさ知覚を向上できるかを調べるために、印象評価実験を行った。

実験刺激としては、視覚刺激は直径の半分まで潰すことができる1種類の柔らかさの仮想物体（直径10cmの球）であり、聴覚刺激は図2に示した8種類である。なお、聴覚刺激の提示順はランダムとした。

実験手順は、まず、視覚刺激のみの仮想物体を掴み、潰して柔らかさを確かめてもらい、続いて、聴覚刺激を付加した仮想物体に対しても同様に柔らかさを確かめてもらった。その後、2つの仮想物体を比較し、以下の質問項目Q1～Q5に、視覚刺激のみの仮想物体の評価を0として、

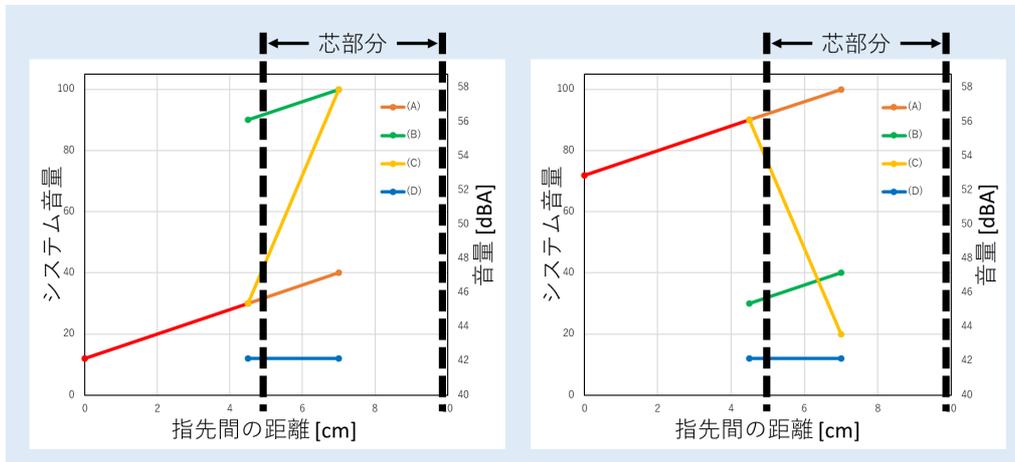


図 2：聴覚刺激（芯部分での音量変化）  
 (A) 芯部分前までと同じ連続変化（上昇） (B) 不連続変化（大きく上昇、大きく下降）  
 (C) 連続変化（大きく上昇、大きく下降） (D) 音なし

聴覚刺激を付加した仮想物体を-3（視覚刺激のみより思わない）～+3（視覚刺激のみより思う）の7段階で評価してもらった。

- Q1: 視覚刺激のみの場合と比較して、仮想球を掴んでいると思いましたが。
- Q2: 視覚刺激のみの場合と比較して、柔らかい仮想球を掴んでいると思いましたが。
- Q3: 視覚刺激のみの場合と比較して、芯のある仮想球を掴んでいると思いましたが。
- Q4: 視覚刺激のみの場合と比較して、重い仮想球を掴んでいると思いましたが。
- Q5: 視覚刺激のみの場合と比較して、仮想球を動かしやすいと思いましたが。

以上を1施行とし、全試行数は160回（聴覚刺激8組×繰り返し2回×被験者10人）となった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 「掴み音」と「放し音」による聴覚刺激と仮想物体の擬似的な柔らかさ知覚

質問項目 Q1～Q5 のそれぞれについて、「1. A」、「2. どちらかといえば A」、「3. どちらかといえば B」、「4. B」を B として選択数を合計し、サーストンの一対比較法を用いて分析した。

質問項目 Q1、Q2、Q5 において、C5-G4 がより多く選択されているため、より低い周波数を持つ完全4度の聴覚刺激を提示することで、「より柔らかい」、「より持っている」、「より掴みやすい」と感じさせられる可能性が示された。また、C5-G4 と C5-G#4 は、質問項目 Q4 では選択数が多くなり、質問項目 Q3 では逆により少なくなっているため、より低い周波数の聴覚刺激を提示することで、「より重い」という感覚を与え、それと関連して「より動かしにくい」と感じさせている可能性が示唆された。

##### (2) 芯部分での音量変化による聴覚刺激と仮想物体の擬似的な柔らかさ知覚

質問項目 Q1～Q5 のそれぞれについて、1 標本 t 検定を用いて分析した。

質問項目 Q1、Q5 において、ほぼ全ての聴覚刺激で有意差が得られたため、視覚刺激と聴覚刺激を一緒に提示することで、視覚刺激のみの場合と比較して、「掴みやすさ」、「動かしやすさ」の提示を有意に向上させられることが示された。また、質問項目 Q2、Q4 の結果より、「柔らかさ」、「重さ」においては、視覚刺激の影響が大きいため、聴覚刺激の付加によるさらなる効果が得られにくいことが示唆されたが、質問項目 Q3 の結果より、芯部分での大きな音量変化は、仮想物体の“潰せる限界の位置”を知覚させるために有効であることが示された。

##### (3) まとめ

本研究では、触覚提示デバイスを用いずに、HMD 上に描画される柔軟仮想物体を素手で掴み操れる AR システムを開発した。実験結果より、本 AR システムを用いて、柔軟仮想物体の視覚的表現に加えて、音量変化による聴覚刺激を提示することで、柔軟仮想物体の掴みやすさや動かしやすさを向上できることが示された。また、柔軟仮想物体の芯部分に着目した聴覚刺激は、柔軟仮想物体の“潰せる限界の位置”の知覚に有効であることも示された。

本研究により、素手による AR インタラクションの適用範囲を柔軟仮想物体まで拡大できた。このことは、今後の AR を利用したインターネットショッピングやシミュレーション、さらには遠隔地にいるユーザと仮想空間を共有して行う AR コミュニケーションの発展に貢献するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 久米 佑太, 佐藤 美恵	4. 巻 72
2. 論文標題 変形限界における聴覚刺激が素手による仮想物体の柔らかさ知覚に与える影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 J116-J118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.3169/itej.72.J116">https://doi.org/10.3169/itej.72.J116</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Mie Sato, Zentaro Kimura, Yuki Tanaka, Natsumi Motoura, Naoki Hashimoto, Arie E. Kaufman
2. 発表標題 Effects of Sound Volume Change When Squeezing a Virtual Soft Object with a Bare Hand
3. 学会等名 2018 International Conference on Cyberworlds (CW) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mie Sato, Ishigaki Sato, Sho Kato, Arie E. Kaufman
2. 発表標題 Examination of perception with auditory stimuli when grasping a virtual soft object with a bare hand
3. 学会等名 2019 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久米 佑太, 佐藤 美恵
2. 発表標題 仮想物体の視聴覚変化が素手による把持知覚に与える影響
3. 学会等名 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	カウフマン アリ  (Kaufman Arie E.)	ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校・Computer Science Department・Distinguished Professor	