

平成 31 年 5 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06573

研究課題名(和文) Pseudo-Hapticsを用いた両手による物体変形操作感覚提示手法

研究課題名(英文) Displaying Deformable Sense of Virtual Objects With Two Hands Using Pseudo-Haptics

研究代表者

伴 祐樹 (Ban, Yuki)

東京大学・新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：20789391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はPseudo-Hapticsの効果を両手での6軸方向の物体操作に拡張することで、両手を用いたダイナミックな物体変形における深部感覚を操作可能な視触力覚ディスプレイを実現することである。そのため、物体-手間にかかる剪断方向の圧力値と手の姿勢情報を計測するシステムを構築し、曲げ・捻りを始めとするバーチャル物体の変形を伴うヨー・ピッチ・ロール方向の手姿勢操作アルゴリズムを実装した。実験の結果、バーチャル物体の変形にあうように姿勢位置を変調したバーチャルハンドを提示することで、物体変形感に対するリアリティを向上させられることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はPseudo-Hapticsの効果をバーチャルハンドに適応させる上で、重要な原理の発展を提供するものである。触力覚提示研究としては、従来の物理的なディスプレイ単体では困難であった、両手を用いた多様な物体変形に簡易な機構で対応できる触力覚ディスプレイの実現という意味を持ち、一方Pseudo-Haptics研究としては、これまで明らかにされてきた片手操作における3軸自由度での変調から、両手操作における6軸自由度での変調への効果範囲の拡張という意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：We proposed the visuo-haptic display which can modify the perception of deforming objects using Pseudo-Haptic effects. To realize this system, we developed the system which can measure load forces to the handled object with various direction and posture of users' hands. Then, our system deformed virtual objects due to measured load forces, and modified the posture and position of users' hands to fit to the deformed virtual object. Through the user studies, we revealed that displaying virtual hands enhance the reality of deforming objects.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：Pseudo-Haptics バーチャル物体変形 視触覚間相互作用 クロスモーダル バーチャルリアリティ 把持力推定

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

触力覚を物理的に再現する触力覚提示デバイスとは異なるアプローチとして、ユーザの運動中の身体部位または身体運動を投影したポイントの映像に時間的・空間的变化を加えることで、実際にかかる力を変化させることなくテクスチャ等の皮膚感覚、力や物体硬さ等の深部感覚を擬似的に生成可能な錯覚現象、**Pseudo-Haptics** が注目を集めている。申請者はこの現象を汎用的な触力覚提示に応用し、片手で物体を触る手の動きを取得し、物体と指の接触点位置がバーチャルな物体表面をなぞっているように時間的・空間的に変調してバーチャルハンドとして提示することで、実際に触っている物体形状とは異なる形状を知覚させる視触力覚システムを実現してきた[1]。しかし、本手法ではバーチャルハンドの3軸方向の移動量操作による効果生起しか確認されておらず、物体を捻る操作等に対する回転方向の動きの変調は実現していない。回転方向に対する**Pseudo-Haptics**は、操作部とディスプレイ部が離れている状況[2]では確認されているものの、バーチャルハンド操作に対しては、物体と接触している両手位置の同定や、手首・肘の回転まで含めた姿勢変調が難しいためである。また、両手を用いた**Pseudo-Haptics**に関しても、変調後の接触点間の空間的整合性維持の困難さ故に実現されていない。

[1] Ban et al. Modifying Perceived Size of a Handled Object through Hand Image Deformation, Presence, 22-3, pp.255-270, 2013

[2] Paljic et al. Evaluation of pseudo-haptic feedback for simulating torque, HAPTICS, pp. 216-223, 2004

### 2. 研究の目的

本研究の目的は**Pseudo-Haptics**の効果を両手での6軸方向の物体操作に拡張することで、両手を用いたダイナミックな物体変形における深部感覚を操作可能な視触力覚ディスプレイを実現することである。先に述べた通り、従来のバーチャルハンドを用いた**Pseudo-Haptics**では、自然な姿勢変調の難しさ故に、空間に固定された物体をなぞる程度の3軸自由度での変調しか実現できなかった。本研究はこれを拡張し、手の姿勢認識・操作を深度カメラを用いてより精密に行うことで、回転方向まで考慮した高自由度のバーチャルハンドに対する**Pseudo-Haptics**の実現を目指す。これにより、実際には変形しない物体を把持していても、バーチャル物体を変形させているかのように知覚させられる手法を実現する。

### 3. 研究の方法

物体・手間にかかる剪断方向の圧力値と手の姿勢情報を用いて、曲げ・捻りを始めとするバーチャル物体の変形をヨー・ピッチ・ロール方向の手姿勢操作アルゴリズムを構築する。具体的には、両手での物体操作に対し、バーチャル物体の変形に合わせてヨー・ピッチ・ロール方向の手首の回転量を視覚的に操作し、**Pseudo-Haptics**を生起させるアルゴリズムを開発する。具体的には、深度カメラによる骨格認識を活用し、変形前と変形後の物体形状の差分から回転・移動量を算出し、バーチャルハンドのボーンに適用させる(図1)。例えば、申請者らは現段階の予備の実装として、手首に対してロール方向の回転量を視覚的に操作する姿勢操作フィードバックを構築している。これをもとに、物体表面に貼り付けた圧力センサシートより得た物体・手間の圧力値から、バーチャル物体をその硬度に合わせて変形させるとともに、変形に応じて姿勢操作フィードバックを生成する手法を構築する。検証の簡略化のため、このフェーズでは物体は空間に固定した状態を想定している。上記の検討により構築したアルゴリズムをもとに、変形しない物体に対する変形操作感覚や、物体に対する変形時の硬さ知覚等の深部感覚についての操作が可能か検証する。申請者の過去の実験では、単に実物体と異なる形状のバーチャル物体のみを表示した時よりも、その形状に合わせて動くバーチャルハンドも含めて提示した時の方が、**Pseudo-Haptics**の効果が強まり、形状知覚を操作しやすいことが明らかになっている。本研究の姿勢操作FBでも同様の効果が期待できるため、バーチャルハンド提示時と非提示時で物体変形に対する深部感覚操作の効果がどれほど変化するかを被験者実験により明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 片手での物体変形フィードバックシステム・アルゴリズムの開発

片手での物体操作に対し、バーチャル物体の変形に合わせてヨー・ピッチ・ロール方向の手首の回転量を視覚的に操作し、**Pseudo-Haptics**を生起させるアルゴリズムを開発した。まず図2に示すような、円筒形物体を片手で握った際の物体への力の入れ具合を計測できるシステムを構築した。把持部はアクリル製の円筒形であり、片側が土台に固定されている。円筒部分には物体にかかる力を方向まで計測するために歪みゲージを図1右側のように配置した。これにより、曲げ・ねじり・曲げ方向の力を計測できる。歪みゲージだけではかかっているちからの絶対量を計測できないため、図3に示すように、ワイヤーにより一定の重さの重り(1, 3, 5kg)を各方向に力がかかるよう吊るすことでキャリブレーションを行なった。

本デバイスにより計測した物体へ入力される力の大きさと方向を用いて、バーチャル物体を変形させそれに応じてバーチャルハンドの姿勢も変調するアルゴリズムを実装した。Head Mounted Display (HMD) に深度カメラ (Leap Motion) を取り付け、手の姿勢情報をリアルタイムに計測できるようにした。本システムでは絶対座標空間における物体をつかんでいる手の位

置は固定されているため、マーカにより物体の位置を認識する必要はない。

続いて歪みセンサより計測した値を用いてバーチャル物体を変形させるアルゴリズムについて述べる。まず、6つの歪みゲージより曲げ・伸縮・捻りどの方向に力がかかっているかを判別する。その後、かかっている力の大きさに応じて、バーチャル物体を変形させる。入力大きさに応じた変形量を調整することで、バーチャル物体の硬さに対する知覚を操作することができる。加えて、バーチャル物体をつかんでいる位置の変形量と軸方向の角度の変化に合うようにバーチャルハンドの位置・姿勢を調整することで、変形したバーチャル物体をつかんで変形させているような視覚フィードバックを実現した(図4)。視触覚間相互作用による変形感提示に取り組む研究は数少ないが、これまでの報告者らの研究により、物体形状の大きさ・幅については±3割程度、角面等の角度については±30度程度実物体とバーチャル物体の形状が異なっているにもかかわらず、視覚フィードバックの効果によりバーチャル物体を触っていると知覚させられることを確かめている。そのため本研究でも最大その程度の変形までは視触覚間相互作用の効果を生起させられると考え、バーチャル物体変形量の最大値を、引っ張り・押し込み方向に関しては円筒形状の長さ方向の±0.35倍、曲げ・ねじりに関しては両手間の角度35度に設定した。

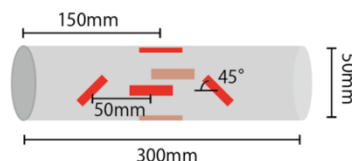
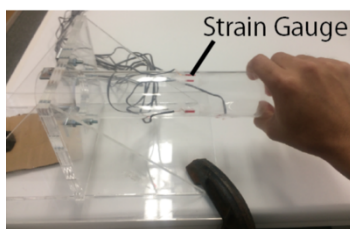
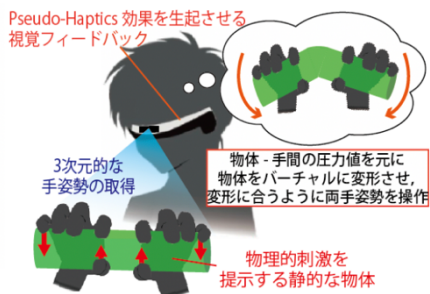


図1 実装した物体変形感提示システム 図2 物体へかかる力方向・大きさ計測デバイス

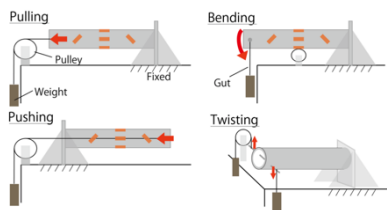


図3 歪みゲージのキャリブレーション 図4 バーチャルハンド姿勢変調アルゴリズム

## (2) 筋電計測による物体への力入力方向推定手法の提案

(1)で述べたシステムの構築に際して、物体への力入力方向測定のためのセンサの貼り付け等のコストが高いことが明らかになったため、物体にはセンサを貼り付けず、ユーザの上腕部に装着した筋電センサから把持物体への負荷力方向・大きさを推定する手法を提案・実装した。具体的には、物体を把持している手の上腕に筋電計測系(Thalmic Lab社製Myo:8ch筋電系)を装着し、把持物体に力を加えた際の前腕部表面筋電位の変化から、把持物体に対する引っ張り、曲げ、ねじりと いった力方向とその大きさを推定する手法の構築した。歪みゲージから計測した力入力方向・大きさ情報と、筋電値との対応を学習させることで、筋電値のみから物体にかかる力を推定する(図5)。Myoの8チャンネルの筋電位センサでは腕の筋電位として-128~127までのデジタル値が200Hzのサンプリングレートで得られる。このストリーミングデータに対しフレーム数128ごとにハミング窓を掛けてFFT処理し、出力される実数部・虚数部を極座標に変換して強度データのみを抽出した。こうして得られた数値に対し、各チャンネルについて10フレーム分の移動平均を取り、識別のための入力データとした。

学習モデルとしてはConvolutional Neural Networkを用い、6軸方向の力の大きさを出力させた。構築した把持力推定手法の精度を評価するため、被験者内実験を行なった。実験は10名の被験者を対象に行なった。先に述べた円筒形デバイスに対して、引っ張り(引)、押し込み(押)、曲げ(上、下、手前、奥の4方向)、ねじり(右手が奥向き/手前へ向かうねじりの2方向)の8種類の方向への力をかけさせた(図6)。入れる力の大きさについては、現在の入力大きさと目標をバーで表示するようにし、引っ張り・押しに関しては30N、ねじり・曲げについては50N・mが最大になるように目標値として設定した。各動作に対して「5秒間かけて徐々に力を加えていき、目標最大負荷力で5秒間キープ」を一試行のサイクルとし、実験参加者には一方向につき12試行を行うように指示した。そのため、被験者は本実験中に96試行(=8方向x12試行)のタスクを行うこととなる。入力力方向の順番は被験者間でバランスが取れるように設定した。各方向の入力に対し、実際に計測した6軸力センサ値の大きさと前腕sEMGから推定した値とを比較することで、本手法により各方向への力入力大きさがどの程度正確に推定できるかを示す。比較の際は、6軸方向の値それぞれについてNormalized Root Mean Square Error (NRMSE)を算出する。加えて、力方向の識別については、推定した6軸力方向の値のうち最も絶対値の大

きいものが、実際の入力方向と一致しているかどうかで判別した。

まず、8種類の力入力における6軸の力実計測値とsEMGからの推定値のNRMSEを図7左に示す。本結果より、どの入力方向に関しても10%以下の誤差精度で推定できていることが見て取れる。本実験においては、各入力方向に対する推定誤差に有意な差は認められなかった。

加えて、入力方向の識別率については図7右のような結果が得られており、どの方向に関しても90%以上の高い識別性能を有することがわかった。本検証に関しても、各入力方向に対する推定誤差に有意な差は認められなかった。以上より、上腕部筋電計測により、把持物体にかかる力の大きさ・方向が推定できる可能性が示唆された。

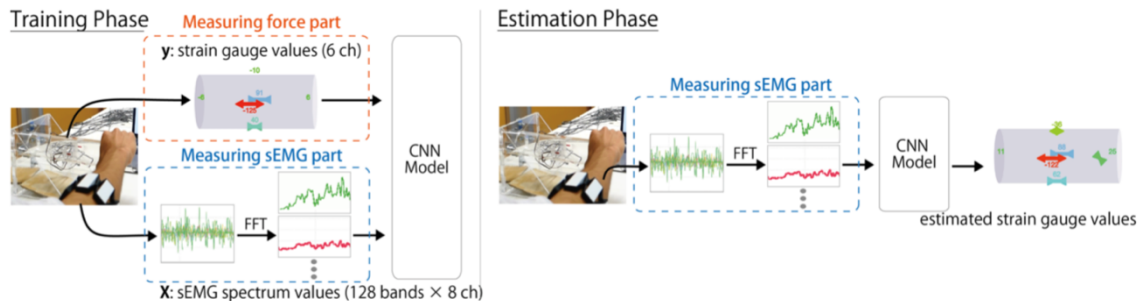
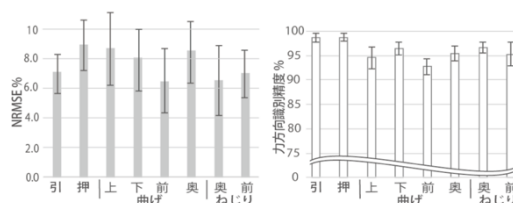


図5 上腕部筋電計測による、物体への把持力方向・大きさ推定



図6 学習する8種類の力方向（逆方向は省略） 図7 推定結果（左：把持力推定誤差，右：力方向識別精度）



### (3) 両手での物体把持におけるバーチャル物体変形フィードバックの構築

上述した検証をうけ、両手で物体を把持した際の変形感を提示できるシステムを構築した。深度カメラによる手姿勢認識については(1)と同様の手法を用いたが、物体への把持力の方向・大きさ計測については静電容量式6軸力センサ(DynPick, ワコーテック社)を把持物体に装着することでデバイスの取り回しを向上させた(図8)。本センサにより $f_x, f_y, f_z$  [N],  $m_x, m_y, m_z$  [N・m]という物体にかかっている6軸周りの力の大きさが計測できる。また、システムにおいては物体に対して両手の相対位置は固定のため、深度センサより認識した手の位置関係より把持物体の重心位置・角度を算出し、バーチャル物体に反映させた。バーチャルハンド姿勢変調アルゴリズムに関して、(1)で構築したものを両手に拡張し、図9に示すようにバーチャル物体の変形に合わせて両手の姿勢・位置が変化する視覚フィードバックを構築した。



図8 物体へ両手で力をかけた際の方向・大きさ計測デバイス

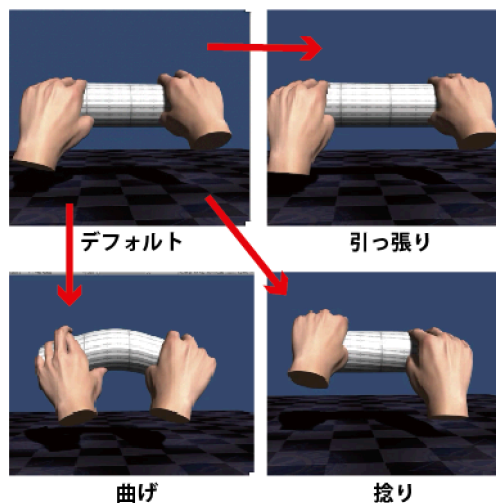


図9 手姿勢変形フィードバック

### (4) 視触覚フィードバックによるバーチャル変形感提示効果検証

実際には変形しない物体を把持しているにもかかわらず、バーチャル物体を変形させている感覚を提示できるかを検証した。実験は5名の被験者(22~25歳, 女2, 男3)を対象として行った。本実験では、力を加えた際の変形量を様々に操作してバーチャルな硬さを提示することによって、変形時に知覚するリアリティがどのように変化するかを検証した。本実験では力センサの

組み込まれていない長さ 300[mm]直径 60[mm]の亚克力製円筒物体に対して、引っ張り、曲げ、ねじりの3方向への力をかけさせた。力を加えた際の変形量については、引っ張り方向については0.2, 0.4, 0.8[N/mm]の三段階、曲げ、ねじりについては95.6, 144, 287[N/rad]の三段階の硬さを設定し、それぞれに対して力を加えた際の変形感のリアリティについて7段階評価(1:全くリアリティがない, 7非常にリアリティがある)で回答させた。試行回数は各硬さ、力方向の組み合わせにつき一回ずつ、計9回であった。また、バーチャルハンドを提示することによる変形感知の効果を確認するため、バーチャルハンドを提示しない条件でも同様の試行を同じ回数実施した。試行の順番は被験者間でバランスが取れるようにした。

図10に各硬さ、力方向の試行に対するリアリティについての評価(平均, 標準誤差)を示す。本結果より、提示する硬さが硬いほど知覚するリアリティが高く、バーチャルな硬さがある一定値を下回った際に知覚するリアリティが急激に低下することが確認された。具体的には、引っ張りタスクの0.2N/mm, 0.4N/mm条件での結果を比較した場合、0.4N/mm条件では平均5.1と比較的高い評価値を得ているにもかかわらず、0.2N/mm条件では平均2.7とリアリティがないとの回答が非常に強くなった。同様の傾向が曲げ方向の結果にも現れている。一方、バーチャルハンドを提示しない場合では、提示時に比べ全体的にリアリティが低下することが確かめられた。加えてバーチャルハンドの提示・非提示にかかわらず、同じ角度方向の知覚操作でも、曲げタスクとねじりタスクで知覚されるリアリティに差が生じることが確かめられた。これは、曲げ方向とねじり方向では、曲げ方向の方が視覚的に知覚される変化量大きいことに起因していると考えられる。

以上より、バーチャル物体の変形感の提示においては、バーチャルハンドの提示による視触覚間相互作用の生起が有用であることが示され、変形度合いを効果的に視覚提示することが錯覚生起に重要であることが示唆された。

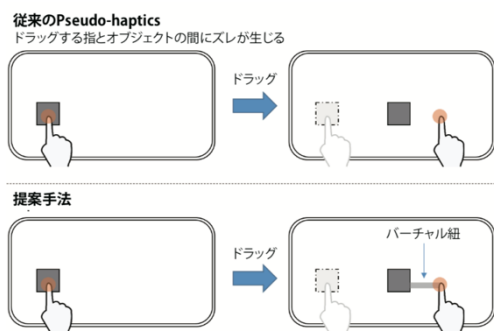
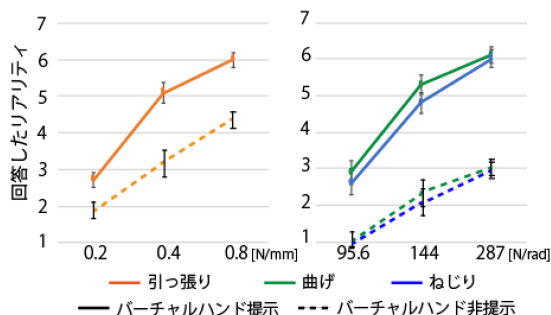


図10 各方向の変形に対するリアリティの評価 図11 バーチャル紐によるタッチスクリーン上でのPseudo-haptics生起

#### (5) 視触覚間相互作用の効果を向上させるための工夫検討

本研究において、効果的に錯覚効果を生起させることのできる視触覚フィードバックを生成するため、Pseudo-Haptics効果の増強手法や、実触覚刺激との組み合わせの効果についても検討した。前者については、入力位置とそれを反映するポインタの位置のズレが明確になってしまうため錯覚効果が弱まってしまうことが知られているタッチスクリーン上でのPseudo-Haptics生起において、CD比の提示により生じる入力位置とポインタ間のギャップをバーチャルな紐で繋ぐことで飛躍的にPseudo-Haptics効果を向上させられることが確かめられた(図11)。また、Pseudo-Haptics効果と実振動刺激を組み合わせることで、実振動の大きさに対する知覚を操作できることが明らかになった。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

[1] Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, Koichi Hirota, "Modulating Fine Roughness Perception of Vibrotactile Textured Surface using Pseudo-haptic Effect.", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 25(5), IEEE, pp.1981--1990, 2019 [査読有]

[学会発表] (計 5 件)

[1] Yuki Ban, "Illusion based Shape Display using the Visuo-Haptic Interaction", International Display Workshop 2019, INP4-2, 2019, [招待講演]

[2] 伴祐樹, "sEMGを用いた把持力推定によるバーチャル物体変形感提示", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第22回大会, 32A-6, 2018, [査読無]

[3] Yuki Ban, "Estimating the Direction of Force Applied to the Grasped Object Using the Surface EMG.", International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp.226--238, 2018, [査読有]

[4] Yuki Ban, Yusuke Ujitoko, "Enhancing the Pseudo-Haptic effect on the touch panel using the virtual string.", 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 278--283, 2018 [査読有]

[5] 伴祐樹, "表面筋電信号を用いた把持物体への力方向推定", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第 22 回大会, 3D2-06, 2017, [査読無]

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。