



# 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

伴祐樹<sup>1)</sup>

1) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒113-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

**概要** : passive haptics は複雑な装置を用いることなく多彩な触体験を創出できるが、そのほとんどは静的な物体に関する提示に限られており、加えた力に応じて変形するような動的な物体提示には用いられていない。その原因の一つとして動的物体提示を実現するには、把持物体にかかる力を計測しそれを元に物体変形視覚フィードバック (FB) を生成する必要があるため、把持物体にかかる力を簡便に計測できる必要があるという点があげられる。

そこで本研究では sEMG に着目し、物体や手指に力センサを取り付けることなく把持力を推定し、それに応じた視覚 FB を生成することで多様な物体変形感を提示できるシステムを提案する。

**キーワード** : 視触覚間相互作用, バーチャル物体変形, 把持力推定

## 1. はじめに

これまで様々な研究がバーチャル環境内でバーチャルな物体に触れる感覚を提示する手法を開発してきたが、それらは大きく分けて 2 つのアプローチに大別される。一つはロボットアームや変形するディスプレイ, 外骨格型デバイス等を用いて直接物理的に力を再現する”active haptics”と呼ばれる手法である。もう一つは、代替となる触覚提示オブジェクトを物理的に用意しておき、それらとバーチャル環境での接触イベントを同期させることによって触覚提示をおこなう”passive haptics”という手法である。 ”passive haptics” は、100% 精確な力を物理的に再現しようとする”active haptics” に比べ、複雑・高価な力覚提示装置を用いる必要がなく、ユーザへの装置装着コストも低いいため、より簡便に表現力の高い触力覚提示が可能という利点をもつ。加えて、これらの “passive haptics” 手法では、視覚的にオブジェクトの位置やユーザの手腕の動きを視覚的に変換して提示することにより、実際には固定された形状変形しないオブジェクトに触れているにもかかわらず、バーチャルな物体の位置や形状に対する知覚を操作して多様な触体験を実現するという試みも行われてきた。

例えば、M. Azmandian らは、視覚的にオブジェクトの位置とそれにアプローチするユーザの手腕の動きを歪めて提示することにより、実際は一つの箱しか動かしていないにもかかわらず、多数の箱を操作しているような感覚を提示できる手法を実現している[1]。筆者らも今までの研究のなかで、実際に触っている物体の形状とバーチャルに触っている物体の形状差を算出し、それに応じてユーザの手の

Yuki BAN

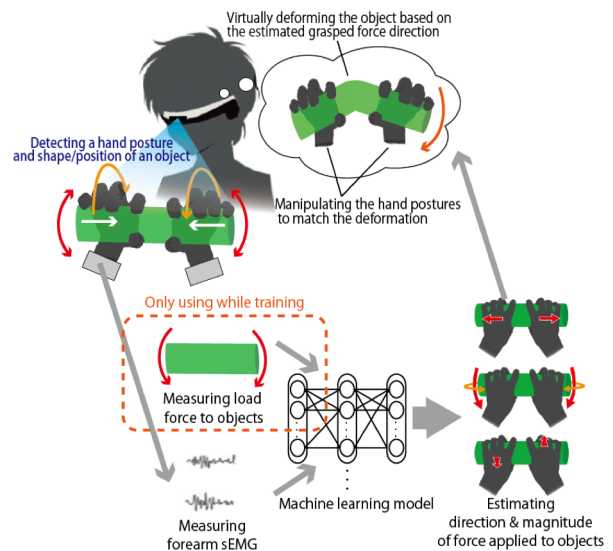


図 1: sEMG を用いた把持力推定による物体変形感提示

動きや姿勢を変換することによって、あたかもバーチャル物体をなぞっているかのような視覚フィードバックを生成し、触っている物体の大きさ、角の傾き等の知覚を操作できることを確かめてきた[2]。

さらに “passive haptics” 手法では、ユーザが把持物体にかかる力を計測し、それに応じてバーチャル物体の形状を視覚的に変形させることにより、物体の硬軟感に対する知覚も操作できることが明らかになっている[3]。しかし、これらの手法では、適切な視覚フィードバック刺激を生成するために実際に把持物体にかかっている力を計測する必要がある。そのため、カメラにより物体形状・位置やユーザの手腕の動きのみを計測すれば良い、バーチャル物体形状・位置等、静的要素の知覚操作に比べ、計測コストが高

なくなってしまう。そのため、そうしたバーチャル物体の変形感を提示するシステムとしては、押下による物体の凹み等簡単に力計測可能な一方向の変形提示程度しか実現・検証されてこなかった。

把持物体への負荷力を計測する手法としては、直接物体やグローブ型デバイスに力計測センサを貼り付ける方法と、物体把持時の前腕部表面筋電位 (sEMG) の変化から把持力を推定しようとする方法がある。前者のメリットはセンサを貼付するだけで力を測定できるようになる点である。しかし、把持物体に毎回センサを貼付する必要があったり、センサを貼付できないような物体表面形状によってはセンサをあらかじめ内蔵する必要があるというデメリットも多い。グローブ型デバイスにセンサを装着する場合に関しても、直接物体をさわれなくなってしまう、多様な方向の力まで計測できるようにしようとするとセンサの厚みが増し操作性が低下する。といった欠点がある。

一方、後者の sEMG を用いる手法は、山海らが開発した外骨格型ロボットスーツである HAL をはじめとした動作支援システムや、リハビリテーション、介護支援等に主に用いられている[4]。筋が収縮する際には各筋線維より活動電位が発生する。発揮する筋力が弱い場合、収縮する筋線維の数は少なく済むが、強い筋力が必要な場合収縮する筋線維の数も増加する。この筋収縮の際に筋線維から発生する活動電位を表面の電極で捉えたものが sEMG である。力のかけた方や強さにより発火する筋線維の位置や数が変わってくるため、sEMG を計測することでユーザの動きや力入力を推定する助けとなる。先に述べた動作支援システムの他にも、ジェスチャ入力における識別手法として積極的に活用されている[5]。

本研究の目的は、sEMG を用いて物体・身体にセンサを貼付せずとも恥物体への負荷力を推定し、それをもとにバーチャル物体を変形させることで、バーチャル物体の変形感を提示できるシステムを構築することにある。筆者は Convolutional Neural Network (CNN) を用いることで、計測した前腕部 sEMG から、把持物体にかかる力方向を推定するシステムを実現してきた[6]。しかし、本手法では物体にかかっている力の大きさまでは推定できなかった。

そこで本稿では、本提案手法を改善し、把持物体への力入力方向だけでなく、大きさまで計測できるようなシステムを実現し、それをもとに、実物体への力入力に応じてバーチャル物体を変形させる視覚フィードバックを生成するシステムを構築する(図 1)。これによりこれまで主に静的変換により物体の位置や形状についての知覚を操作してきた“passive haptics”の効果を、バーチャル物体を変形させる感覚の提示にまで拡張させることができると考えられる。これにより、例えばバーチャル空間内で把持物体に力を加えて粘土をこねるように変形させながら物体のリモデリングを行うといったインタラクションが実現できるようになる。

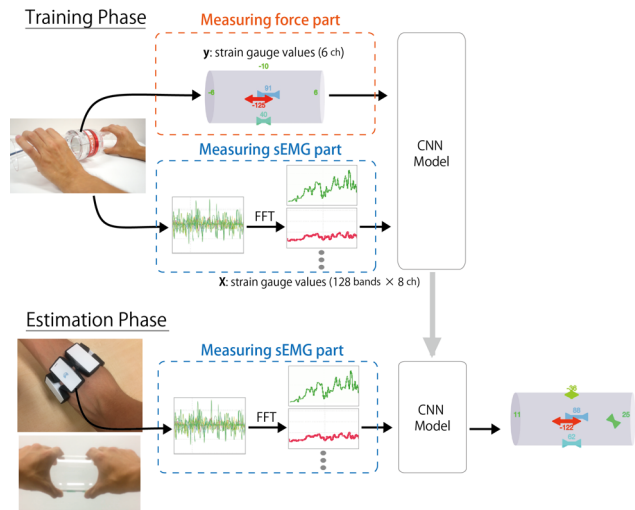


図 2: システム構成

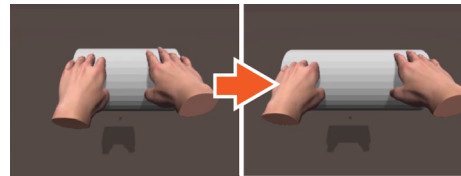


図 4: 力の入力により、物体の形とバーチャルハンドの姿勢が変化

## 2. 提案手法および実装

本提案システムは、1. sEMG を計測することにより把持物体にかかる力方向・大きさを推定するシステムと、2. 推定した物体への負荷力からバーチャル物体変形感を提示する視覚フィードバック生成システムから構成される。

### 2.1 前腕部 sEMG 計測による把持物体への負荷力方向・大きさ推定システム

あらかじめ把持物体に力を加えた際の前腕部 sEMG の値と、実際に物体に加わっている力を毛計測しその対応を学習させることによって、sEMG を計測するだけで物体に対する負荷力を推定する手法を構築する (図 2)。

筆者の先行研究と同様、筋電位センサとして Thalmic Lab 社製の Myo を用い、信号の前処理も同様のものを用いた。Myo の 8 チャンネルの筋電位センサから得られた FFT 解析後の数値データは、個々のセンサが別々の値を示す。物体を把持した際の力のかける方向を推定するため、これらの値を CNN にかけた。入力層は前処理後データ 128 バンド x 8 チャンネルである。教師データを構築するため、実際に物体にかかっている力を計測する必要があるが、本稿ではそのために静電容量式 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、引っ張り/押し・曲げ・ねじり入力を行った際にそれらの力の大きさが計測できるようなシステムを構築した。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。そのため、モデルの出力層は力センサから算出した物体にかかる 3 軸の力 [N]



図 4: 学習する 8 種類の力方向 (逆方向は省略)

+3 軸のモーメント力[N・m]の大きさを表す 6 ユニットとなる。ネットワークモデルは先行研究[6]で構築したものを採用した。オプティマイザは Adam, 学習率は 0.001 とし, 損失関数は Mean Square Error を用いた。

## 2.2 バーチャル物体変形感提示の為の視覚フィードバック生成システム

2.1 により推定した物体への力入力方向・大きさを元に, 実際には変形しない実物体を把持しているにもかかわらず, あたかも入力した力に応じて把持物体が変形しているかのような感覚を提示できるシステムを構築する。把持する実物体, バーチャル物体としてはねじりや引っ張り等様々な方向に力をかけやすい円筒形状を選択した。

Head Mounted Display (HMD)を通じてユーザに視覚フィードバック映像を提示し, HMD 前面に貼付した Leap Motion によりユーザの手の動きを取得する。HMD にて, 実物体と同形状のバーチャル物体と, バーチャルハンドを視覚提示する。2.1 のシステムにより推定した把持物体への負荷力の大きさ・方向を元に, HMD にて提示するバーチャル物体を変形させるとともに, それに合わせてバーチャルハンドの位置, 姿勢も操作することで, あたかもバーチャル物体を自らの手で変形させているかのような視覚フィードバック映像を生成する(図 3)。

実際には変形しない実物体を用いた, 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, これまでの筆者らの研究により, 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も, 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。

## 3. 前腕 sEMG 計測による把持力推定検証実験

### 3.1 実験概要

構築した把持力推定手法の精度を評価するため, 簡易的な被験者内実験を行った。実験は 10 名の被験者(22~26 歳, 女 2, 男 8)を対象として行った。全ての被験者が右利きであり, どの被験者も日常的な運動習慣は週 2 時間以下であった。

### 3.2 タスク設計

本実験では力センサも含めて長さ 300[mm]直径 60[mm]

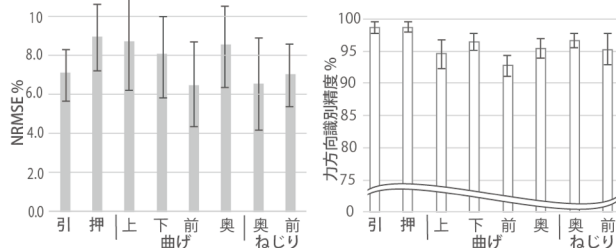


図 5: 結果(左:把持力推定誤差, 右:力方向識別精度)

の亚克力製円筒物体に対して, 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 4)。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 30[N], ねじり・まげについては 50[N・m]が最大になるように目標地として設定した。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 x 12 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。

### 3.3 評価方法

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。

### 3.4 実験結果

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 5 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 5 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。

### 3.5 考察

本実験によって, 本提案手法により円筒形物体把持時の力方向・大きさ推定を高精度で行えることが示唆された。力方向として学習したのは 8 種類であったが, これ以外の力方向であっても, 出力層に現れる状態の確率分布の組み合わせである程度推定可能だと考えられる。そのため本手法を活用することで, 力センサを物体や手に貼付しなくても VR システム等でのバーチャル物体への負

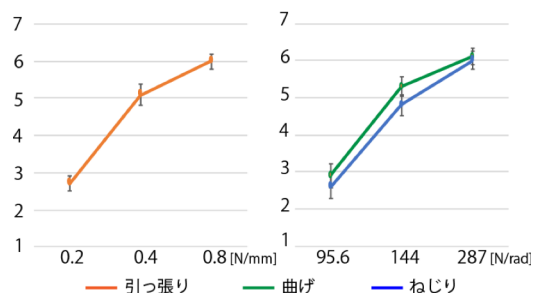


図 6: 各方向の変形に対するリアリティの評価

荷力を用いるインタラクションを実現できるようになると考えられる。

しかし、今回の実験では物体の把持姿勢や物体形状は固定だったため、それらが変わった際にも本手法が適用可能かは検証する必要がある。特に、把持姿勢が変わると筋電のパターンも大きく変わるため、本手法のみでは対応が難しいことが想定されるが、姿勢まで含めた学習系を構築することにより問題解決が可能だと考えられる。

#### 4. バーチャル物体変形感提示の効果予備検証

##### 4.1 実験概要

先の実験で検証した、sEMG による把持力推定システムを用いて、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。

##### 4.2 タスク設計

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、引っぱり、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、引っぱり方向については 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。試行の順番は被験者間でバランスが取れるようにした。

##### 4.3 実験結果・考察

図 6 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、引っぱりタスクの 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。

加えて、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が大きいに起因していると考えられる。そのため今後、把持物体のテクスチャを変形がより確認しやすいものにしたたり、把持しているバーチャルハンドを提示しないことによって、変形感のリアリティに対する知覚がどのように変化するかを検証する必要がある。

#### 5. おわりに

VR システムにおける物体変形感を提示する手法として、前腕部 sEMG から把持物体にかかる力の大きさ・方向を推定し、それを元に視覚的にバーチャル物体とバーチャルハンドを変形させる手法を提案した。実験の結果、sEMG により把持力方向だけでなく、その大きさについても 10% 以下の精度で推定が可能であり、また本手法を用いたバーチャル物体変形システムにより、実際に把持している物体は静的なものにもかかわらずリアリティの高い変形感覚を提示できることを確かめた。今後は多様な把持姿勢に対応できるように姿勢の推定、取得を同時に行いながら力推定を行う手法を検討すると共に、バーチャルな硬さや最大変形量、バーチャル物体表面のテクスチャ、バーチャルハンドの提示等が変形感のリアリティにどのような影響を与えるのかをより詳細に検証していく。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (研究活動スタート支援)「研究課題番号 17H06573」の助成を受けて実施されたものである。

#### 参考文献

- [1] Azmandian, M. et al.: Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences. In Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1968-1979 (2016)
- [2] Ban, Y. et al.: Modifying an identified angle of edged shapes using pseudo-haptic effects. EuroHaptics, pp. 25-36 (2012)
- [3] 伴祐樹ら: "手形状変形フィードバックを利用した把持動作における硬さ知覚操作", 日本 VR 学会論文誌, Vol.19 No.4 pp.523-532, 2014.
- [4] 山海 嘉之ら: 筋電位を用いた歩行支援のための外骨格パワーアシストシステム HAL-1 に関する研究, 茨城講演会講演論文集, pp.269--270, 2000.
- [5] M. Atzori et. al.: Deep Learning with Convolutional Neural Networks Applied to Electromyography Data: A Resource for the Classification of Movements for Prosthetic Hands, Frontiers in Neurobotics, Vol.10, No.9, 2016.
- [6] 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 VR 学会第 22 回大会, 3D2-06, 2017.