



# 投影型拡張手インタラクションに対する 深層学習を用いた触覚フィードバック推定

佐藤優志<sup>1)</sup>, 平木剛史<sup>1)</sup>, 松倉悠<sup>1)</sup>, 岩井大輔<sup>1)</sup>, 佐藤宏介<sup>1)</sup>

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3,  
{y.sato, hiraki}@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {haruka.matsu, daisuke.iwai, sato}@sys.es.osaka-u.ac.jp)

**概要:** プロジェクタからユーザの手の代替となる拡張手を投影する拡張現実インタフェースにおいて、投影拡張手が実物体に触れた際ユーザはその触感を得られない。この問題に対し拡張手への視覚効果付与より疑似触覚フィードバックする手法があるが、物体輪郭や質感に関する事前付与が必要となる。本稿では、シーンの RGB-D 画像から深層学習により動的に適切な視覚効果や触覚フィードバックを推定し付与するシステムを提案する。加えて、システムのプロトタイプを構築し、その実現可能性について調査した結果について報告する。

**キーワード:** 物体質感認識, 疑似触覚, 投影手

## 1. はじめに

超少子高齢化が進展し労働不足や要介護者数の増加が懸念される現在、人間の身体的能力を拡張させる技術の発展、実用化が待ち望まれている。この技術の一つに、日常シーンにおけるユーザの手の到達範囲の拡張を実現した投影型手拡張インタフェースがある [1]。このインタフェースは、ユーザの手の動きを増幅してバーチャルハンドの動きに反映し、プロジェクタからバーチャルハンドを投影する。以後、投影されたバーチャルハンドを投影拡張手と呼ぶ。これより、ユーザは投影拡張手を介して、遠くの物体に対して自分の手のような直観性を持って働きかけることが可能となる。

我々はこの投影拡張手が実物体上に投影された際、拡張手の指先を振動させる等の視覚効果を付与することで、疑似触覚フィードバック [2] により、物体に触れた感覚をユーザに知覚させる手法を提案している [3]。この研究では視覚効果による触覚提示能力を調査し、視覚効果のみでも様々な物体の触感を伝えられることを確認した。ただしこの研究では、利用環境中に存在している物体の位置や種類は予めモデルとして与えられている前提としており、事前にモデルの手動設定が必要なうえ、動的に変化する環境に対しては利用できない。

本稿では、既存研究 [3] のシステムに環境のリアルタイム観測系を新たに組み込み、投影拡張手が物体に触れた際に、ユーザに違和感なくその物体に触れていると知覚させる視覚効果 (以後、適切な視覚効果と呼ぶ) を自動的に推定して付与するシステムについて提案する。また、そのプロトタイプを構築し、提案システムが企図通りに動作するか調査した結果について報告する。

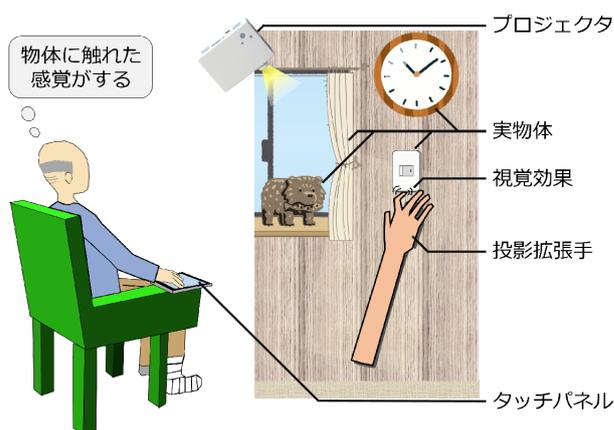


図 1: 投影拡張手による物体とのインタラクションと疑似触覚による物体の触覚フィードバックの概要

## 2. システム概要と要件

本稿で提案するシステムでは、拡張手が実物体に侵入する際に、拡張手の指関節を曲げることで物体間の段差に指が引っかかった感覚をユーザに知覚させたり [4]、拡張手が凸凹した物体表面を撫でている際に、指先を振動させることで物体表面の凸凹形状をユーザに知覚させる [3] ことを想定している (図 1)。このように、投影拡張手が環境とインタラクションしているように拡張手の投影像を操作することで、疑似触覚によりユーザに物体に触れている感覚を提示できる。さらに、それによりユーザの拡張身体体験のリアリティや没入感を向上させられる可能性がある。

提案システムの実現のためには、ユーザの手の動きを拡張手の動きに反映させる従来のシステム [1] に加え、以下の 4 要素が必要となる (図 2)。

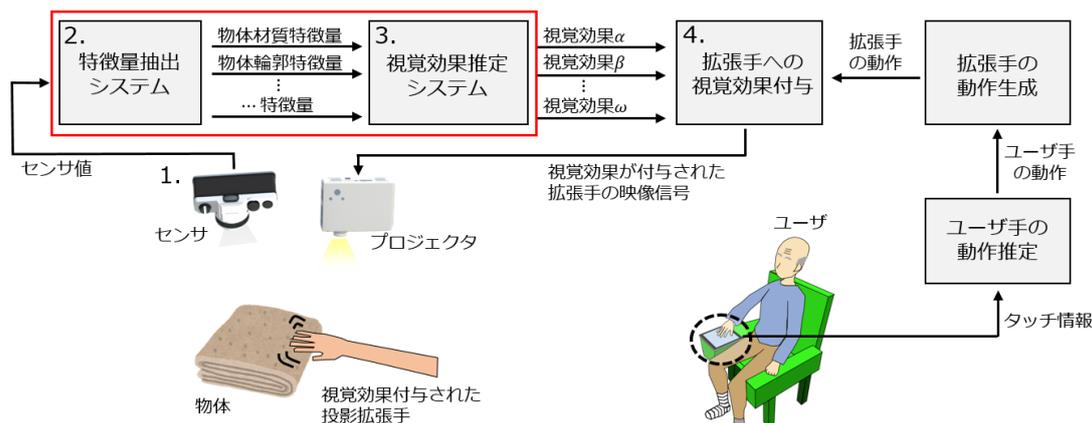


図 2: 提案システムの処理フローの概要

1. 投影拡張手が触れている周辺領域のセンシング
2. センサ値から物体特徴量（材質特徴や形状特徴など）の抽出
3. 物体の特徴量に対する、ユーザが物体の触感を知覚できる適切な視覚効果の推定
4. 推定した視覚効果の投影手への反映

なお 2, 3 の要素は、センサ値と適切な視覚効果の対応関係データが用意できれば、深層学習を用いてセンサ値から視覚効果を end-to-end で推定するネットワークを構築し、一つの要素にまとめる手法が適用できる（図 2 赤枠）。

### 3. プロトタイプシステムと動作検証

#### 3.1 プロトタイプシステムの構築

環境センシング用センサとして、本研究では小型で既存システムに組み込みやすく、拡張手の周辺領域を非接触に測定できる RGB-D カメラ（Intel, RealSense L515）を用いた。RGB 画像より物体の材質情報を、Depth 画像より物体の形状情報を取得することが可能であり、これらは視覚効果を決定する際に重要な特徴である。RGB-D カメラはプロジェクタの隣に取り付けられ（図 3a）、30 fps で RGB 画像（1920 × 1080 pixel）と Depth 画像（1024 × 768 pixel）を PC（Microsoft, Surface Pro 4）に送信する。PC は受信した RGB-D 画像を予め取得しておいた RGB-D カメラプロジェクタ間の画素間対応行列（ホモグラフィ行列）により幾何変換した後、プロジェクタ投影範囲のみを切り出した（図 3b）。

RGB-D 画像を用いた各視覚効果の強度推定においては、本研究では RGB 画像の各画素に対して適切な視覚効果の種類と強度値が設定された視覚効果マップ画像が得られると仮定した（3.2 節参照）。そのため、画像から画像を出力するネットワークである U-Net [5] を視覚効果推定ニューラルネットワークとして用いた。切り出された RGB-D 画像（図 3b）は、YCrCb-D 画像に変換、画像サイズを 256 × 256 pixel にリサイズ、各画素値を [-1, +1] に正規化された後、ネットワークに入力される。ネットワークは画素

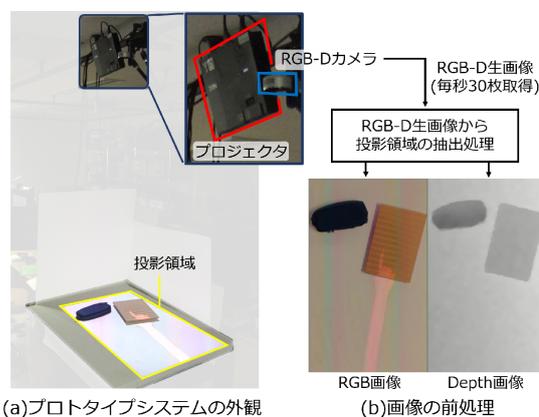


図 3: プロトタイプシステムの外観と画像の前処理

ごとに視覚効果の種類とその強度値が設定された視覚効果マップ画像を出力する。なお、プロトタイプでは視覚効果の種類は指関節が曲がるエフェクト 1 種類のみ限定した。

拡張手への視覚効果付与処理は、拡張手指先位置に対応した視覚効果強度値をマップ画像より毎フレーム取得し、その値を拡張手に反映させることで実現される。

#### 3.2 データセットの作成

3.1 節の通り、実装システムを動作させるためには、RGB-D 画像の画素ごとに視覚効果の種類と強度値が設定された視覚効果マップ画像が必要となる。本研究では、被験者実験を通して適切な視覚効果マップ画像を得ることを目標としているが、本稿では予備調査として画像のエッジ特徴を用いたマップ画像を用いた。具体的には、RGB-D 画像に対して、物体の境界部分の画素で指関節が曲がり、また、物体間境界の段差が大きいほどその曲がり角が大きくなる視覚効果を付与する視覚効果マップ画像を作成した。本研究では、物体の種類や位置を変化させた RGB-D 画像を 125 枚撮影し、それぞれに対して視覚効果マップ画像を設定することでデータセットを作成した。図 4 に作成したデータセットの一部を示す。

#### 3.3 プロトタイプシステムの動作検証

3.1, 3.2 節で述べたプロトタイプシステム、データセットを用いて、実環境での動作検証を実施した。

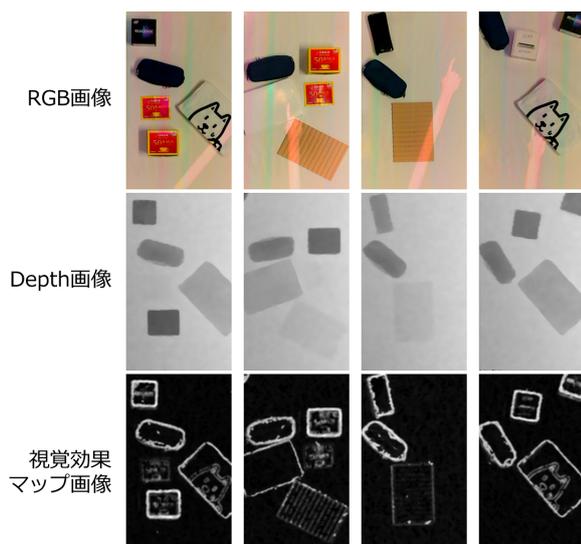


図 4: 作成したデータセットの一例

前述のデータセットを訓練画像 100 枚、検証画像 25 枚に分けた。訓練画像を画像反転、輝度変調、クリッピング処理を用いたデータ拡張により 1000 枚に増やした後、バッチサイズ 25 枚、100 エポックでネットワークを学習させた。検証画像 25 枚に対する MSE (画素値を  $[0, 1]$  に正規化) は 0.00388 であった。学習したネットワークパラメータを、3.1 節のプロトタイプに組み込んだ。

データセット外の RGB-D 画像に対する適用性を確認するために実環境で動作検証を実施した。その結果、実環境においても投影拡張手が物体境界に差し掛かった際に、拡張手の指関節が曲がる効果が付与されることを確認した。推定されたマップ画像についても図 5 に示す通り、物体境界に視覚効果を付与し、かつ物体間の段差が大きい箇所程より大きな視覚効果を付与する画像となった。また、プロトタイプシステム (CPU: 2.20GHz) の場合、視覚効果マップ画像 (画像サイズ:  $256 \times 256$  pixel) を 1 枚推定するためにかかる時間は約 300 ms であった。このままでは、シーン中で素早く移動し続ける物体に対しての視覚効果付与は難しいが、基本的に静止しており時々位置や形状が変わるような物体であれば、低性能の PC であっても適切な視覚効果付与が可能である処理時間である。

以上より、提案したシステムフローで、環境に対して拡張手が動的に視覚効果を付与できることを確認した。なお、今回は視覚効果が 1 種類であったが、視覚効果の種類が増え、強度推定ネットワークの数が増えた場合でも、これらは並列処理が可能であるため、スケーラブルに計算リソースを増やせば計算時間に影響を与えないものと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では投影型手拡張インタフェースにおいて、環境をリアルタイムセンシングし、その観測内容に応じた適切な視覚効果を拡張手に付与するシステムを提案した。提案システムのプロトタイプを構築し、拡張手が物体間境界

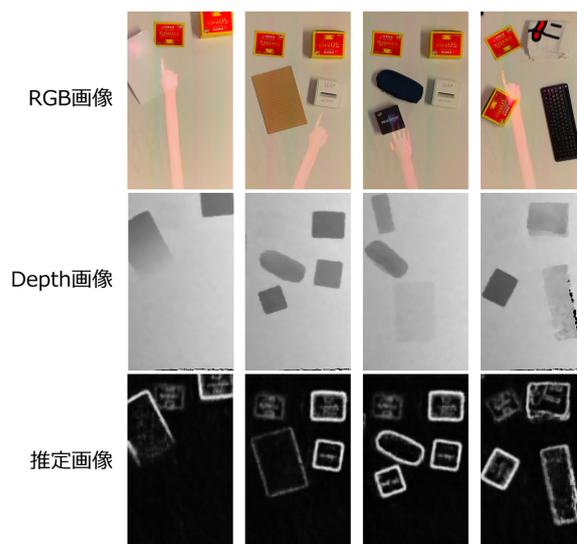


図 5: 実環境で動作させた結果の一例

に差し掛かった際に、指関節が曲がる視覚効果が付与されることを確認した。今後は視覚効果の種類を増やした場合についても動作することを確認する。加えて、心理実験を実施して視覚効果マップ画像の教師データを収集し、これを用いてネットワークを学習させることで提案システムの完成を目指す。さらに、完成したシステムを用いて、ユーザの拡張身体体験に与える影響について調査する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP16H02859 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] Yuta Ueda, Yuki Asai, Ryuichi Enomoto, Kai Wang, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Body cyberization by spatial augmented reality for reaching unreachable world. In *Proc. 8th Augmented Human International Conference*, pp. 19:1–19:9, 2017.
- [2] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, Paul Richard, and Philippe Coiffet. Pseudo-Haptic Feedback: Can isometric input devices simulate force feedback? In *Proc. IEEE Virtual Reality*, pp. 83–90, 2000.
- [3] Yushi Sato, Takefumi Hiraki, Naruki Tanabe, Haruka Matsukura, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Modifying texture perception with pseudo-haptic feedback for a projected virtual hand interface. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 120473–120488, 2020.
- [4] 松井孝太, 佐藤宏介, 岩井大輔. バーチャルハンドの視覚効果による操作者への疑似触覚フィードバック. 第 19 回システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 377–380, 2018.
- [5] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pp. 234–241, 2015.