



投影型手腕拡張インタフェースにおける 視聴覚効果による浮遊・接触感提示

Presentation of Hovering-and-Contact Sensations Using Visuo-Audio Effects
in the Projection-Based Extended Hand Interface

佐藤優志、石川蒼桜、竹内悠人、岩井大輔、佐藤宏介

Yushi SATO, Ao ISHIKAWA, Yuto TAKEUCHI, Daisuke IWAI, and Kosuke SATO

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@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp)

概要: プロジェクタからユーザが自在に操作可能な CG 手腕像を実空間に投影し、ユーザの手の到達範囲を視覚的に拡張するインタフェースでは、投影された CG 手腕像 (拡張手) を空中に表示することはできない。本研究では、拡張手の影の表示や物体をなぞった音 (触音) の再生の有無を適宜切り替えることで、拡張手が実物体に接触していることや、物体上を浮遊していることをユーザに知覚させる方法を提案する。予備実験の結果、影表示と触音再生によりユーザの拡張手の浮遊感知覚が、触音再生により接触感知覚が強化されることが示唆された。

キーワード: 投影ハンド、浮遊・接触感、影表現、触音

1. はじめに

人間の身体能力を技術により拡張し、生来の身体では不可能だったことを可能にする身体拡張技術の一つに、投影型複合現実感を利用して手の到達可能範囲を視覚的に拡張する ExtendedHand インタフェースがある。これは、ユーザの手の動きをカメラ [1] やタッチ端末 [2] などでセンシングし、その動きを増幅して CG 手腕の動作に反映し、プロジェクタから CG 手腕 (拡張手) を投影するインタフェースである。投影の性質上、拡張手は実空間の広範囲に表示可能であり、これより、ユーザが自身の手の届かない様々な対象に拡張手で指示したり、触れたりするアクションが可能となる。ただし投影の性質上、拡張手は実空間の実物体表面上に表示せざるを得ず、ユーザは拡張手が常に実物体に接触しているように知覚してしまう。特にタッチ端末型 ExtendedHand の場合、拡張手を操作するためにユーザの手はタッチ端末に接触するため、よりこの知覚は強くなる。

本研究では、拡張手の影表示や触音 (物体を手でなぞった際に発生する音) 再生をユーザの手入力に応じて切り替えることで、拡張手が浮いていたり、投影面に接触しているのを表現できるようになると考えた。本稿では、タッチ端末型 ExtendedHand [2] において、ユーザの手入力に応じて浮遊感・接触感を表現する制御モデルおよび、予備検討の結果について報告する。

2. 浮遊感・接触感表現

本研究では拡張手の浮遊・接触状態を、浮遊レベル $h \in [0, 1]$ を使って表現する。 $h = 0$ は拡張手が物体表面に接触している状態、 $h = 1$ は浮遊量が最大の状態である。

2.1 節では、ユーザのタッチ入力と浮遊レベル h の対応関係を説明する。2.2 節と 2.3 節では、浮遊レベル h に応じた影表現と触音再生についてそれぞれ述べる。

2.1 タッチ入力での浮遊・接触状態の表現

1 章で述べた通り、本研究ではタッチ端末型 Extended-Hand を対象としている。拡張手の操作時、ユーザの手は常にタッチ端末に接触することとなる。この状態で拡張手の浮遊・接触状態およびその中間状態を表現できるようにするため、本研究ではタッチ面積を用いる。一般にタッチ面積は押下力に比例して大きくなる。これを利用し、本研究ではユーザがタッチ端末を軽く押下している際は浮遊、強く押下する際は接触を表現するようにする。具体的にはタッチ面積 A に応じて浮遊レベル h を次式のように設定する。

$$h(A) = \begin{cases} 1 & A < A_{min} \\ 0 & A > A_{max} \\ \frac{A_{max}-A}{A_{max}-A_{min}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

本研究では浮遊レベルを表現するタッチ面積には下限 A_{min} と上限 A_{max} を設け、 A_{min} 以下 (タッチ端末に接触していないを含む) では浮遊量最大状態、 A_{max} 以上では接触状態にあるものとする。

2.2 影エフェクト

2 次元で浮遊を表現する上で、影は頻繁に用いられる。我々のグループでも、手の輪郭線のみ代理手 (輪郭手) において、影を模したエフェクトがユーザの浮遊感知覚を向上させることを確認している [3]。本研究でもこれらに倣い、拡張手の影を用いて浮遊感の表現を行う。

図 1: 浮遊レベル h に応じた影エフェクト

現実空間では負の光（照らした箇所を暗くする）は存在しないため、本研究では図 1 に示すように、拡張手周辺領域を明るくし、その明るくした領域を用いて影を表現する。影の描画は Unity 等のレンダリングエンジンを用いて容易に行える。本研究では CG 手腕の右側に影が現れるように影を描画した（図 1 参照）。

浮遊レベル h に応じて CG 手腕のピッチ角 θ （図 1 の θ ）を次式のように変化させる。

$$\theta(A) = \theta_{max}(1 - h) \quad (2)$$

ここで θ_{max} は、CG 手腕の示指の指先が、影を表示する平面と接触する際の CG 手腕のピッチ角である。これにより、 $h = 1$ （浮遊）では拡張手の手から腕の全体に渡って一定幅の影が表示される。 h が小さくなると、手先に向かうにつれ影の幅が小さくなり、腕の根元（肘）の浮遊量は変わらず、手先が地面に接近するような状態を表現することになる（図 1 参照）。

2.3 触音エフェクト

我々のグループの先行研究で、拡張手が物体上に表示されている際の触音再生により、ユーザの材質感知覚や物体接触感知覚が向上することを確認している [4]。

本研究でもこれらの研究に引き続き、物体接触時の触音再生を行う。これまでの、ユーザの手入力に関係なく、物体上で拡張手が動いていれば触音を再生していた。本研究では浮遊レベル $h = 0$ 、すなわちユーザがタッチ端末を一定の強さ以上で押下している（タッチ面積が A_{max} 以上）時のみ触音を再生するものとし、そうでなければ触音再生を行わないようにする。

3. 提案手法の浮遊・接触感表現力の調査実験

3.1 実験概要

提案した浮遊・接触表現手法により、ユーザの拡張手浮遊感・接触感知覚を強化させられるか、また、影エフェクトと触音エフェクトのそれぞれの影響を調査するために、ユーザ調査実験を実施した。

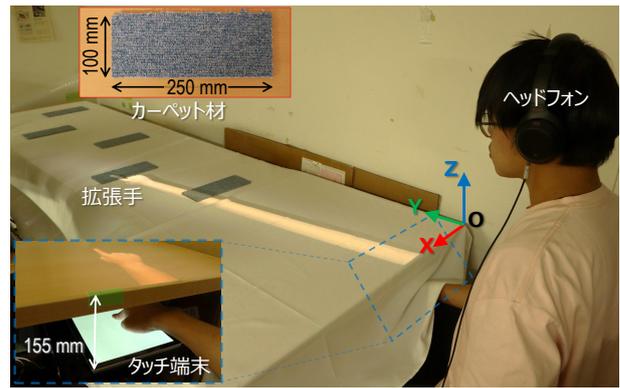


図 2: 実験環境

3.2 実験条件・実験環境

本実験では独立変数として、影エフェクトの有無と触音エフェクトの有無を用意した。また従属変数として、拡張手の浮遊感と接触感に加えて、手の固有受容感覚のドリフト量 [5]（参加者の手の固有受容感覚知覚の拡張手使用前後の変化量）を設定した。拡張手の利用経験と提案する浮遊エフェクトにより、拡張手が浮遊して机面よりも高い位置に存在していると参加者に影響がある場合に、ドリフト量が大きくなる（参加者の手の固有受容感覚知覚が拡張手の方向に誘導される）可能性があると考えたためである。

実験環境を図 2 に示す。参加者は机下に設置されたタッチ端末（Microsoft 社、Surface Pro 6）を使って、机上の拡張手を操作した。拡張手で触れる物体として 250 mm × 100 mm × のタフテッド機カーペット材（東リ社、GA1043）を 5 枚用意し、机端 0.8 m から 2.4 m まで 0.4 m 間隔で配置した。

3.3 実験方法

参加者は実験説明を受けた後、以下のタスクを 4 条件（影エフェクトの有無 × 触音エフェクトの有無）のそれぞれで行った。各条件の提示順はランダム化し、参加者間でバランスをとった。前回のタスクの影響を抑制するため、タスク間は 10 分以上間隔を開けるようにした。

拡張手使用前の固有受容感覚の測定：参加者は机下のタッチパネルを右手示指 1 本で操作して、机上に投影された拡張手の示指の指先を指定の場所（図 2 中に記載した座標系で $(X, Y, Z) = (300 \text{ mm}, 300 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ の位置）に移動させた。拡張手が指定場所に来る時、参加者の右手示指の指先が $(300 \text{ mm}, 200 \text{ mm}, -155 \text{ mm})$ の位置に来るようにプログラムしていた。その後、実験者が机側面から地面に向けて巻尺を展開した。参加者は自身の右手示指の指先の腹が、図 2 の座標系の Z 軸方向においてどこにあると感じるかを巻尺の目盛の数値で回答した。

カーペットなぞりタスク：参加者は、システムが赤丸ポインタで指示しているカーペット材を拡張手でなぞるタスクを 100 s 程行った。システムは 10 s 程で対象のカーペット材を変更し、参加者に様々なカーペット材をなぞらせた。この際カーペット材は強くなぞり、カーペット材間の移動時

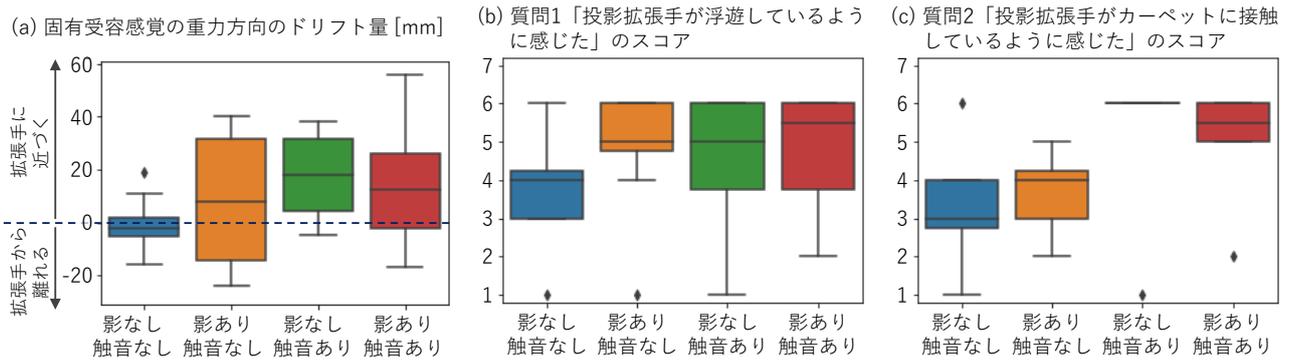


図 3: 実験結果

には軽くなぞるように参加者に指示し、参加者に影エフェクトや触音エフェクトの切り替わりを体験させるようにした。

拡張手使用後の固有受容感覚の測定：参加者は再び (300 mm, 300 mm, 0 mm) の位置に拡張手示指の指先が来るよう、拡張手を移動させた (指定場所に来た際、参加者の示指の指先の腹は (300 mm, 200 mm, -155 mm) の位置に来る)。その後、参加者は自身の右手示指の指先の腹の Z 軸方向の位置を、実験者に提示された巻尺の目盛の数値で回答した。

主観アンケートへの回答：参加者は以下の二つの質問に 7 段階リッカート尺度 (1: 全くそう思わない、...、4: どちらともいえない、...、7: とともそう思う) で回答した。

質問 1 : 投影拡張手が浮遊しているように感じた。

質問 2 : 投影拡張手がカーペットに接触しているように感じた。

3.4 実験結果

本実験は正式実験に向けた予備実験として行っており、8 名に対して実施した。固有受容感覚のドリフト量 (使用後 - 使用前) の結果を図 3(a) に示す。図に記載の通り、ドリフト量が正に大きいほど、拡張手使用后、拡張手の方向 (+Z 方向) に自分の手の固有受容感覚が引っ張られたことを示している。また質問 1 (浮遊感) の回答結果を図 3(b) に、質問 2 (接触感) の回答結果を図 3(c) にそれぞれ示す。

上述の通り本実験は予備実験であり、また参加者数が少ないため、統計検定は行っていない。本節の残りでは結果の傾向について述べるが、今後の追調査で結果が変わる可能性があることに留意されたい。

主観アンケートの結果から、ユーザの拡張手の浮遊感知覚の強化のために、影エフェクトと触音エフェクトの両方が効果的であることが示唆された。また接触感知覚の強化のためには、触音エフェクトが効果的であることが示唆された。実験終了後の口頭報告でも、全参加者から「影エフェクトや触音エフェクトにより、浮遊・接触感が格段に増した」等の肯定的な評価を得た。以上より、提案手法の設計意図通り、影および触音エフェクトは、ユーザの拡張手の浮遊・接触感知覚の強化に有用である可能性が示唆された。

固有受容感覚のドリフト量については、影および触音エ

フェクトがある方が、拡張手の方により引っ張られている傾向があるように見える。ただし、ゴムの手錯覚研究の知見 [5] では身体所有感が生起していれば、(影および触音なし条件でも、) ドリフト量は正になるはずであるが、本実験結果ではその傾向は確認できない。今後はより詳細な実験を行い、統計的に有意な差があるかを確認すると共に、浮遊感や身体所有感との因果関係についても明らかにしていく必要がある。

4. おわりに

本稿では影および触音エフェクトによる拡張手の浮遊感・接触感表現手法を提案し、予備調査を行った。その結果、提案手法がユーザの拡張手の浮遊・接触感知覚の強化に有用であることが示唆された。今後は実験プロトコルを洗練し、多数の参加者に対して心理実験を行い、本手法の有用性や、影 (視覚) と触音 (聴覚) の個別の影響力、身体所有感との因果関係について解明する。またユーザ (拡張手操作者) だけでなく、周囲の観察者の心理についても明らかにしていく。

謝辞 本研究は JSPS 特別研究員奨励費 JP23KJ1454 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] S. Ogawa *et al.* A reachable user interface by the graphically Extended Hand. In *Proc. IEEE GCCE*, pp. 210–211, 2012.
- [2] Y. Ueda *et al.* Body cyberization by spatial augmented reality for reaching unreachable world. In *Proc. AH*, pp. 19:1–19:9, 2017.
- [3] 渡邊あきら他. レーザ走査プロジェクタによる輪郭投影手のミニマル表現と浮遊・接触感提示. *日本 VR 学会論文誌*, Vol. 27, No. 2, pp. 152–161, 2022.
- [4] Y. Sato *et al.* Sound texture feedback for a projected extended hand interface. *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 27673–27682, 2024.
- [5] M. Botvinick and J. Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998.