



投影型拡張手インタラクションにおける 視覚効果付与に関する一考察

佐藤優志¹⁾, 岩井大輔¹⁾, 佐藤宏介¹⁾

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@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {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、そのままではユーザはその感覚を得られない。これに対し、我々は拡張手に手指を揺らす等の視覚効果を付与することで、疑似触覚により物体触感を提示する手法を提案している。これまでに、ユーザに自然にその物体触感を知覚させられる視覚効果の種類やその変化量（以下、適切な視覚効果）は、触れる物体の物理的特徴により変化することを確認している。本稿では物体の物理的特徴に加え、実物体への触れ方等によっても適切な視覚効果が変わるのかを心理実験により調査した。結果、触れる速さや方向、ユーザの趣向によっても適切な視覚効果が変わることが明らかとなった。

キーワード： 疑似触覚, 視覚効果, 投影手

1. はじめに

超少子高齢化が進捗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、日常生活場面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腕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の触覚提示能力を調査し、物体の物理的特徴に適した種類や変化量の視覚効果を付与することで、視覚効果のみでも様々な物体の触感をユーザに提示できることを確認した。一方、この研究では投影拡張手で実物体に触れる際の速さや方向の違いによる影響は考慮していなかった。

そこで本研究では、投影拡張手で実物体に触れる際の拡張手の移動速さや方向の違いが、ユーザに自然にその物体触感を知覚させられる視覚効果（以後、適切な視覚効果と呼ぶ）に影響するのかを心理実験により調査した。本稿ではこの心理実験の結果および視覚効果をインタフェースに適用する際の設計指針について報告する。

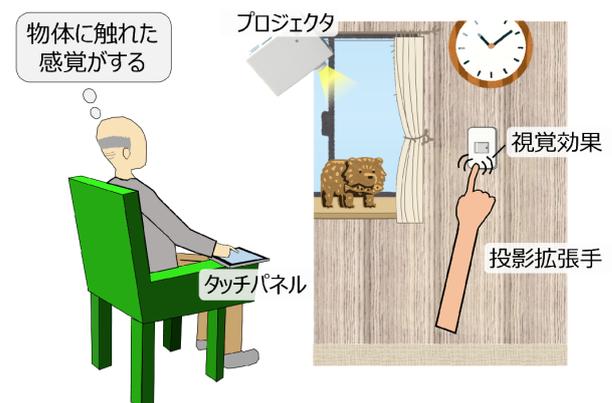


図 1: 投影拡張手による物体とのインタラクションと疑似触覚による物体触覚フィードバックの概要

2. 移動方法と視覚効果の関係調査実験

2.1 実験概要

本実験では投影拡張手の移動方法の違いにより、適切な視覚効果は変化するのかを解明するために、様々な条件で、投影拡張手で物体に触れさせ、適切な視覚効果を回答させる心理実験を実施した。なお視覚効果には様々な種類があるが [3]、本実験では投影拡張手が物体に侵入する際に指関節を曲げることで段差に引っかかった感覚を提示する Bending-finger 効果 (図 2) に限定し、その適切な変化量を回答させた。ここで Bending-finger の変化量は指関節の曲げ限界距離 [mm] (指関節曲げ状態が保たれる限界距離であり、この値が大きい程指関節は大きく曲がることを意味する) で表される [4]。また、指関節の曲がる方向は投影拡張手の進行方向に逆らう方向となるようにした (図 2)。

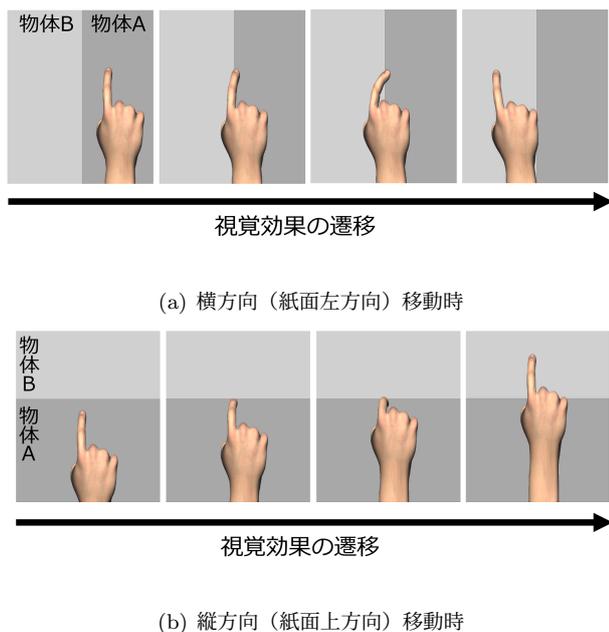


図 2: Bending-finger 効果の概要

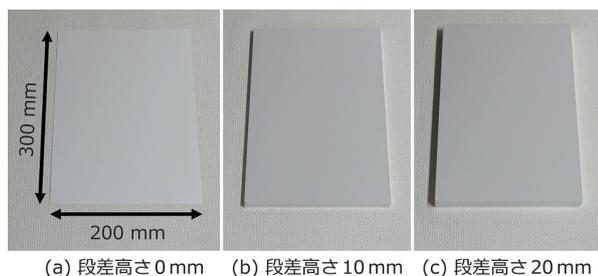


図 3: 段差高さ

2.2 実験条件

本実験では指関節の曲げ限界距離を変化させる要因として、物体の段差高さ、投影拡張手の移動方向、投影拡張手の移動速さの3要因を選出した。各要因の水準は以下の通りである。

- 段差高さ：0 mm、10 mm、20 mm (図 3)
- 移動方向：横方向 (図 2(a))、縦方向 (図 2(b))
- 移動速さ：150 mm/s、300 mm/s

これらの組み合わせより、本実験には12種類の条件があった。

2.3 実験方法

実験は調整法に基づいて実施した。各試行において、参加者はタッチパネルを介して投影拡張手を操作し、机の端から550 mm離れた場所に設置された物体に投影拡張手で触れた(図 4)。投影拡張手が物体に侵入する際は Bending-finger 効果が付与され、その曲げ限界距離は手元の PC 画面に表示されているスライダのバーの位置に応じて決定された。参加者は「最も自然に物体に引っかかっていると感じる曲げ限界距離」となるようスライダバーの位置を調整した。なお、参加者は拡張手が物体から出ていく際は無視し、物体に侵入する際のみを考慮するよう求められた。この試行を

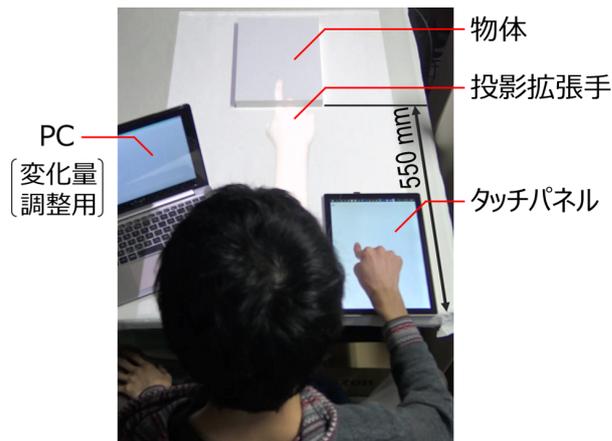


図 4: 実験環境

参加者は12条件×2繰り返しの計24試行実施した。条件の提示される順番はランダム化し、順序効果を抑制するため参加者間でバランスをとった。実験の参加者は21-25歳の12名であり、実験にかかった時間は1名あたり25分程であった。

2.4 結果

図 5 に条件ごとの曲げ限界距離の結果を示す。段差高さ、移動方向、移動速さを要因として三元配置分散分析を実施した結果、全ての要因において主効果で有意差が見られた(段差高さ： $F(2, 22) = 53.5, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.83$ 、移動方向： $F(1, 11) = 87.3, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.89$ 、移動速さ： $F(1, 11) = 20.6, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.65$)。また、段差高さ-移動方向の一次の交互作用、移動方向-移動速さの一次の交互作用に有意差が見られた(段差高さ-移動方向： $F(2, 22) = 55.99, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.35$ 、段差高さ： $F(2, 22) = 7.51, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.41$)。なお、二次の交互作用、段差高さ-移動速さの一次の交互作用には有意差が認められなかった(それぞれ、 $F(2, 22) = 0.81, p > 0.1, \eta_p^2 = 0.07$ 、 $F(1, 11) = 1.16, p > 0.1, \eta_p^2 = 0.10$)。

段差高さ-移動方向 (図 6(a))

段差高さ-移動方向間に有意差が見られたため、事後解析として単純主効果検定を実施した。その結果、移動方向が縦方向、横方向の両方について段差高さで有意差が見られた($p < 0.001$)。続く多重比較(Bonferroni補正)では、縦方向、横方向ともに、 $0 \text{ mm} < 10 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm} < 20 \text{ mm}$ 、 $0 \text{ mm} < 20 \text{ mm}$ であった($p < 0.05$)。一方、段差高さが10 mm、20 mmの場合において移動方向に有意差があった($p < 0.001$)のに対し、段差高さが0 mmの場合は移動方向に有意傾向が見られた($p < 0.1$)。

移動方向-移動速さ (図 6(b))

移動方向-移動速さ間に有意差が見られたため、事後解析として単純主効果検定を実施した。結果、150 mm/s、300 mm/sの両方で移動方向に有意差があった($p < 0.001$)。また、横方向、縦方向の両方で移動速さについて有意差があった(横方向： $p < 0.05$ 、縦方向： $p < 0.001$)。

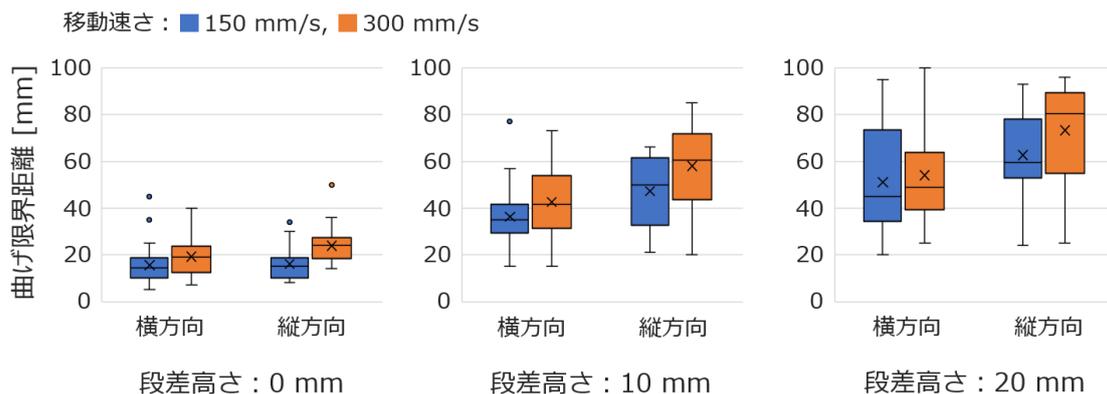


図 5: 実験結果

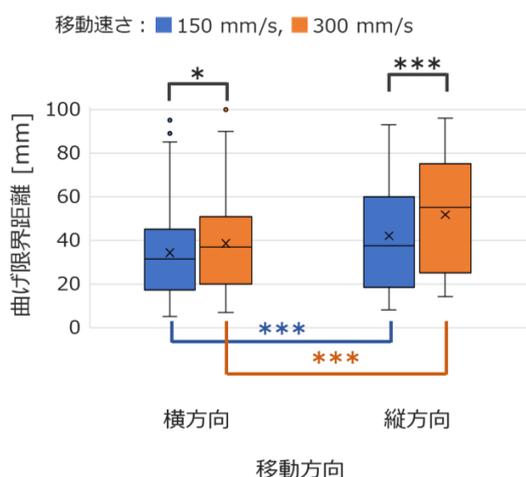
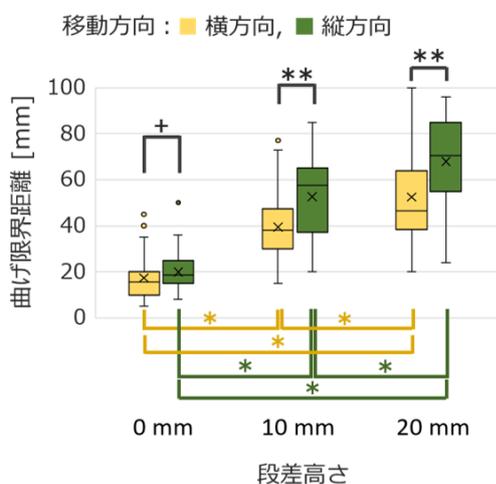


図 6: 交互作用の結果

2.5 考察

段差高さ

段差高さ-移動方向間において、移動方向に関わらず段差高さにおいて有意差が認められたことから、物体の段差高さが高くなるほど、指関節の曲げ限界距離を大きくすべ

きことが明らかとなった。これは実際の指で段差を乗り越える場合、段差が高い程乗り越える過程で指が大きく曲がるが、投影拡張手についても同じ法則が成り立つと参加者が考えたためだと思われる。

興味深い点としては、実際の指では 0 mm の段差を乗り越える際に指先が変化しないにも関わらず、投影拡張手の場合には 0 mm の段差を乗り越える際にも 20 mm 程指先を変化させた方がよかった点である。これは、投影拡張手かつ触覚刺激がない状況においては、別領域に侵入したことを、視覚情報を用いて明示的に表現した方がよいことを示唆していると考えられる。

移動方向

移動方向については図 6(a) のグラフより、横方向より縦方向の方が曲げ限界距離を大きくするべきであり、また段差が高い場合、その差をより大きくするべきことがわかった。

この理由の一つとしては人間の指関節の動作範囲が考えられる。すなわち、本実験では図 2 に示す通り縦方向と横方向で指の第三関節の回転軸が異なっていたが、実際の指の第三関節は、ピッチ（指先を屈伸する）方向には 90 度程曲げられる一方、ヨー（旋回）方向には最大でも 30 度程しか曲げられないためだと考えられる。その他に、参加者からの内観報告において、「横方向の場合には指関節が曲がってもその変化が見えやすいが、縦方向の場合には指関節が曲がると拡張手の掌と重なり変化が見えにくいため、変化が見えるように曲げ限界距離を少し大きめに設定した」という報告が多数あった。このことも横方向と縦方向における曲げ限界距離の違いに寄与したと考えられる。

移動速度

移動速度については、移動方向との間に交互作用があったにも関わらず、事後解析の単純主効果検定より、移動方向に関係なく、移動速度が大きい方が曲げ限界距離を大きくするべきことがわかった。

この理由について、多数の参加者が「移動が早い場合変化を知覚しにくく、そのため変化がはっきり見えるように曲げ限界距離を大きくした。」と報告したことから、実際の指に起こる現象ではなく指先屈曲変化の視認性という投影拡張手特有の現象に起因したのものであると考えられる。

これらの結果をまとめると、投影拡張手は実際の人間の手をベースにしているため、視覚効果付与による投影拡張手の変化も実手・物理現象モデルを基準に考えることが重要となる。その一方、実際には指が曲がることはない段差 0 mm に対し、曲げ限界距離は 20 mm 程度となるなど、実手・物理現象モデルのみでは説明できない点があることも確認した。これより視覚効果を設計する際は、実手・物理現象モデルを基準としつつ、それを視覚効果の視認性という要因で変化の大きさを補正するべきであると考えられる。

2.6 本実験の結論

本実験を通して、Bending-finger 効果の曲げ限界距離は、物体特徴である段差高さだけでなく、投影拡張手の移動方向や移動速さによっても有意に影響することが明らかとなった。具体的数値としては、同じ段差高さの場合でも移動方法の違いにより、曲げ限界距離は 20–30 mm 程変化することがわかった。このことから、視覚効果を生成する際には、物体特徴だけでなく投影拡張手の移動情報も考慮することが重要であるといえる。

また本実験では Bending-finger 効果のみを対象としたが、著者らが以前に提案した他の視覚効果 [3] についても移動方法の違いにより視覚効果の視認性が異なるため、変化量を変えることで効果的に視覚効果を提示できる可能性がある。

3. 参加者間の個人差の影響とその扱い方

図 5 を見ると、特に段差高さが大きい時ほど、参加者間の分散が大きいことがわかる。本節では参加者の個人差の影響を対処する方法についての一考察について述べる。

はじめに、実験結果の値を用いて段差高さ x_h [mm]、移動方向 x_d [°] (横方向条件を 0°, 縦方向条件を 90° とした)、移動速さ x_s [mm/s] の 3 説明変数から曲げ限界距離 l_{th} [mm] を目的変数として予測する重回帰分析を行った。すなわち、次式の係数 $a \sim d$ の値を算出した。

$$l_{th} = a + bx_h + cx_d + dx_s \quad (1)$$

なお、各要因は曲げ限界距離と対数等の関係にある可能性があるが、ここでは簡単のため最も単純な式を用いている。その結果、 $a \sim d$ の値はそれぞれ、 $a = 5.20$ 、 $b = 1.94$ 、 $c = 0.106$ 、 $d = 0.0431$ であった。次に、得られたモデル式が、実験結果データをどの程度説明できるか調べるため、決定係数 R^2 を算出したところ 0.46 であった。一般に、決定係数 $R^2 < 0.5$ 以下はモデルの当てはまりが悪いとされており、三つの要因の値のみでは実験データを上手く説明できないことがわかった。

次に、全条件の曲げ限界距離の値を、多くの参加者の実験結果で最も大きな値をとった段差高さ：20 mm、移動方向：縦方向、移動速さ：300 mm/s の時の曲げ限界距離の値で除した (本稿ではこの操作を正規化と呼ぶ)。そしてその正規化されたデータに対して先程と同様に重回帰分析を行い、決定係数を算出したところ $R^2 = 0.77$ となった (係数 $a \sim d$ はそれぞれ $a = 0.0859$ 、 $b = 0.0280$ 、 $c = 1.63 \times 10^{-3}$ 、

$d = 6.11 \times 10^{-4}$)。一般に R^2 の値が 0.7~0.9 であれば、精度よくデータを説明できているとされており、正規化処理を加えることで、モデル式の予測精度を大幅に向上させることがわかった。

このことは、ユーザが本インタフェースを使用し始める時に、基準物体に触れさせてそれに対して適切な視覚効果の変化量を選択させることにより、基準物体以外の様々な物体に対しても、そのユーザにとっては確からしい視覚効果を生成できる可能性があることを示している。

4. おわりに

本稿では投影拡張手の実物体接触時に、視覚効果付与により触感提示する際に、実物体の物理的特徴および実物体への触れ方と適切な視覚効果変化量間の関係を心理実験により調査した。その結果、実物体の物理的特徴だけでなく、触れる速さや触れる方向によっても、適切な視覚効果変化量に有意に影響することが明らかになり、インタフェース設計時にこれらの要因を考慮すべきことが分かった。さらに、各実験参加者の結果に着目して分析した結果、ユーザの好みも視覚効果変化量に大きく影響することが示唆され、それらを補正することで各ユーザに対して適切な視覚効果を付与できる可能性があることがわかった。

今後は他の視覚効果についても同様の調査を行う他、得られた知見を用いて、投影拡張手の実物体接触に対して適切な視覚効果を自動で推定するシステムを構築し、視覚効果付与による触感提示手法を様々な場所で応用できるようにすることを目指す。

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] 岡原浩平, 小川修平, 新明拓也, 岩井大輔, 佐藤宏介. 身体拡張型インタフェースのための前腕の投影表現に関する基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 349–355, 2014.
- [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] 佐藤優志, 佐藤宏介. 投影型拡張手の実環境接触に対する視覚フィードバック. ヒューマンインタフェースサイバーコロキウム論文集, pp. 329–331, 2020.