

# 上腕拡張UIにおける触覚フィードバックデバイスの 遠隔物体の体性感覚強度の分析調査

新明 拓也<sup>1</sup> 佐藤 宏介<sup>1</sup>

**概要:** 本研究では, Extended Hand と呼ばれる投影型上腕拡張ユーザインタフェースに着目し, Extended Hand 使用時における触覚フィードバック呈示がユーザに与える影響度合について調査した. 触覚フィードバックを高さ・傾き・折れ曲がり・侵入感・通過感の要素に分けて個々に呈示可能なシステムを構築し, 各触覚フィードバック要素を適宜組み合わせることでユーザに呈示することで, それぞれの触覚フィードバック要素がユーザの触覚に与える影響度合についての調査を被験者実験によって行った. それにより, 簡便な触覚フィードバックデバイスの設計指針を得た.

## An Investigation on User's Somatic Sensation by Haptic Feedback Factors in Extended Hand System

SHINMEI TAKUYA<sup>1</sup> SATO KOSUKE<sup>1</sup>

**Abstract:** In this paper, we focus on the projection upper arm extended user interface called Extended Hand. It's described the result of investigation about effects on user's Extended Hand provides haptic feedback. In particular, we constructed the system that can provide each haptic feedback factors separately and combine them, and investigation about influence on user's somatic sensation by haptic feedback factors through subject experiments.

### 1. はじめに

Extended Hand は, 投影によってユーザの上腕を擬似的に拡張する投影型 MR 環境における身体拡張ユーザインタフェースである (図 1). ユーザは投影されたハンドモデルを自分の手のように操作することができ, ハンドモデルを通して投影された仮想物体の操作を行うことができる. これまでの研究では, 投影されたハンドモデルに対してもラバーハンド錯覚のような拡張感が生じるかやハンドモデルの視覚表現の違いによるタスク達成時間への影響についての調査を行った [3]. しかし, これまでの Extended Hand は視覚によるフィードバックしか呈示しておらず, 視覚的な遮蔽がある場合や遠隔地での作業を行う際には不都合があった.

これまで, ユーザインタフェースに触覚フィードバック

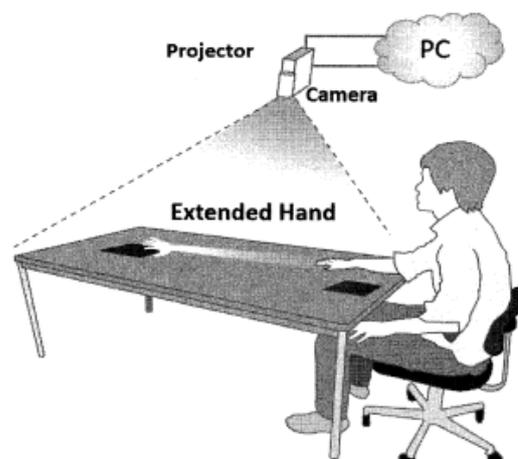


図 1 Extended Hand 概念図 [3]

を導入することで改善を行った研究がいくつかある [4], [5]. 人間にとって触覚は視覚に次いで重要な感覚であると言われており, 触覚フィードバックの導入は自然な発想で

<sup>1</sup> 大阪大学  
Osaka University

あると考える。そこで本研究ではこのアイデアに従って、Extended Hand に触覚フィードバックを導入することで改善を行う。ただし、Extended Hand の持つ機器をユーザの身体に設置しないという利点を無くさないような設計を行う。

本研究では、Extended Hand 使用時におけるユーザへの触覚フィードバック呈示が与える影響についての調査を目的としており、これまでにいくつかの装置を試作し、それらを用いて被験者実験を行った。

一つ目の実験 [1] では、サーボモータを用いてユーザが指を置く台 (フィンガーリフト) の高さを制御し、高さを変化させる (以降、高さ刺激と呼称) 刺激のみを呈示する触覚フィードバック呈示機構とカメラを用いてユーザの掌位置を取得する入力機構を組み合わせた、吊下げ式の入出力装置 (図 2) を構成した。ユーザに呈示する高さの制御によって、一定の高さや段階的な高さ、振動などを呈示可能な Extended Hand システムを試作し、このシステムを用いて被験者実験を行った。この実験では、いくつかの形状が異なる物体に対してどのような触覚フィードバックが好まれるかについて印象の評価及び調査を行った。その結果、ほとんどの被験者が物体の形状に沿った刺激が好むということが分かった。

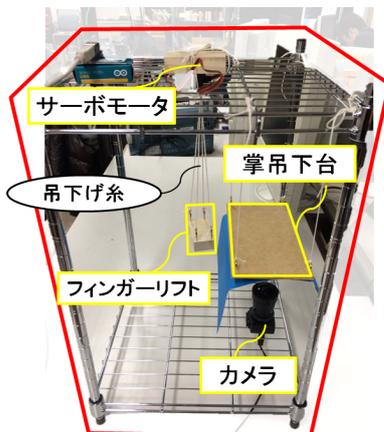


図 2 高さ刺激のみを呈示可能な吊下げ式入出力装置

二つ目の実験 [2] では、フィンガーリフトを中央で折れ曲がる蝶番型にすることで、新たに傾きと折れ曲がりの刺激を呈示可能な触覚フィードバック呈示機構 (図 3) を導入した。これにより、より柔軟な形状刺激が呈示可能な Extended Hand システムを試作し、このシステムを用いて被験者実験を行った。この実験では、3 種類の単純な形状を持つ物体に対して、高さ・傾き・折れ曲がりを組み合わせた 6 種類の刺激要素を用意し、被験者に自由に体験させることで全ての刺激を比較させた (図 4)。その結果、このシステムにおいて高さが最も触覚に効果的な要素であるということがわかった。しかし、吊下げ式の機構では摩擦が与えられないため被験者が自身の手を静止させることが

困難であり、折れ曲がり刺激の有無による影響を評価することができなかった。

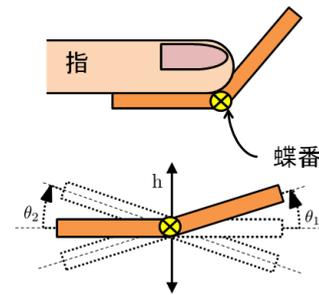


図 3 蝶番型の触覚フィードバック呈示機構

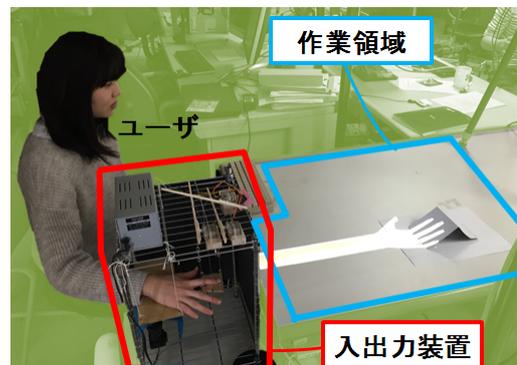


図 4 蝶番型の触覚フィードバック呈示機構による被験者実験の様子

そこで、本研究では新たに非吊下げ式の触覚フィードバック呈示機構を構成した。また新たな触覚フィードバック要素として、(領域) 侵入感・(領域) 通過感を呈示する機構を組み込み、被験者実験を行った。侵入感とは、ハンドモデルが投影されている作業領域平面からそれ以外の領域に侵入する際に、実際に自分の手で触れた際に感じるような刺激のことである。例えば、紙領域に侵入するにはわずかな取っ掛かりがあるような、大きなブロックに侵入するには指先が壁にぶつかるような刺激が与えられる。通過感とは、ハンドモデルがある領域内を移動していることを示すような刺激のことである。以下の章では、システムの構成、被験者実験、考察、結論について順に述べる。

## 2. 触覚フィードバックの構成

図 5 は本システムの構成を示している。本システムでは、ユーザの掌の動作を入力として投影されるハンドモデルを動作させる。そのため、カメラ等を用いてユーザの掌の位置情報を取得し、ハンドモデルの動作に反映させる。また、環境中にある物体の形状情報を取得し、その情報とハンドモデルが投影されている位置の情報からユーザに呈示する触覚フィードバック量を算出する。算出した触覚フィードバック量に基づき、触覚刺激呈示装置を用いてユーザに触覚フィードバックを呈示する。

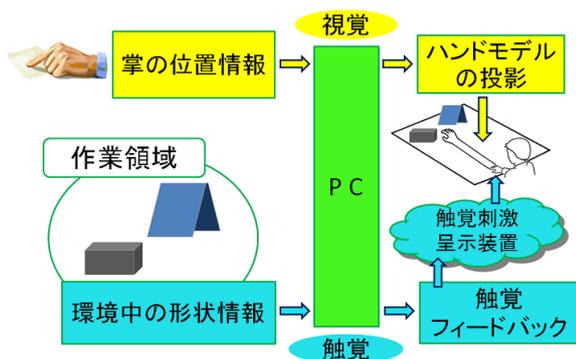


図 5 提案システムの構成

本研究では、新たにユーザの指先に侵入感・通過感を呈示する機構を構成する。これらの刺激を呈示するに当たり、侵入感・通過感を呈示するためにはどのような刺激がよいか、体性感覚 (Somatic Sensation) の中から数種類の刺激を用意して予備調査を行うことで、効果的であると思われるいくつかの刺激を予め選定した。侵入感の呈示には、指先に接触した振動子の振動による擬似的な接触表現及び物体を一瞬だけ実際に接触させる手法を選定した。通過感の呈示には、指の腹全体が振動し続ける刺激及び実際に摩擦を呈示する手法を選定した。ただし本稿では実装の都合上、侵入感・通過感の呈示にはいずれも携帯電話用の小型振動子による呈示を行った。

図 6 は、本実験用に作成した触覚フィードバック呈示機構を表している。高さ・傾き・折れ曲がりを呈示する機構の制御方法は前報 [2] と同様に、蝶番の連結部及び両端の高さをサーボモータで制御することで高さ・傾き・折れ曲がりを呈示する。今回は非吊下げ式のシステムであるため、サーボモータによって蝶番の連結部及び両端を持ち上げる機構を 3D プリンタを使用して作成した。一台の振動子を指先に直接触れる位置に設置し、指先への接触を擬似的に呈示することで侵入感を表現する。また、もう一台の振動子を蝶番の裏側に設置し、指の腹全体を振動させることで通過感の呈示を行う。これにより、高さ・傾き・折れ曲がり・侵入感・通過感の 5 種類の刺激を呈示する。図 7 は、実際に試作した非吊下げ式のボックス型触覚フィードバック呈示装置である。入出力装置の側面にマーカを設置し、それを横に設置したカメラで検出することで、ユーザの掌位置の入力とした。

### 3. 被験者実験

本実験の目的は、前回の実験 [2] で評価できなかった折れ曲がり刺激の評価及び新たに触覚フィードバック要素として加えた侵入感・通過感による影響の調査である。

#### 3.1 実験構成

試作した非吊下げ式触覚フィードバック呈示機構を使用

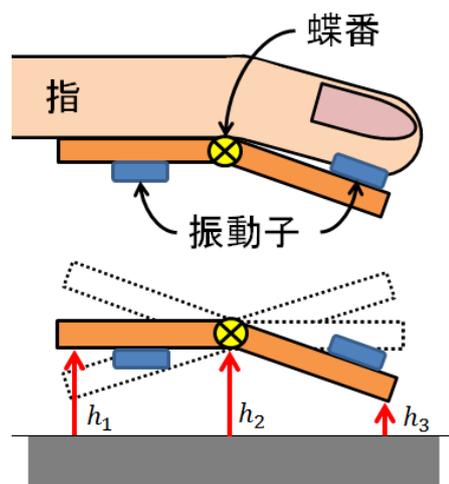


図 6 5 種の刺激を呈示する触覚フィードバック呈示機構

蝶番の連結部の高さ ( $h_2$ ) 及び両端の高さ ( $h_1, h_3$ ) をサーボモータで制御することで両側の板の角度及び全体の高さを制御する。

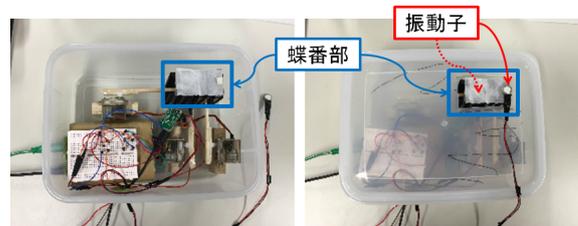


図 7 5 種の刺激を呈示する非吊下げ式入出力装置

(左) 実装の中身。サーボモータに取り付けた腕で蝶番部の連結部及び両端の高さを制御する。(右) 装置の外見。蝶番部におけるユーザの指先が置かれる部分と、指の腹に当たる部分の裏側に振動子を設置。

して、高さ・傾き・折れ曲がりを組み合わせた 4 種類の位置覚刺激 (ここでは、体性感覚のうちの固有受容性感覚における指先体勢の感覚) と侵入感・通過感を組み合わせた 4 種類の触覚刺激 (ここでは、体性感覚のうちの皮膚感覚における振動受容の感覚) をキーボード入力によって被験者が自由に変更できるようなシステムを設計した。[S1]~[S4] に割り当てた位置覚刺激と [V1]~[V4] に割り当てた触覚刺激の詳細を以下の表 1, 2 に示す。

表 1 位置覚刺激の種類

	高さ	傾き	折れ曲がり
[S1]	有	有	有
[S2]	有	有	無
[S3]	有	無	無
[S4]	無	無	無

対象物体は山型の物体と箱型の物体を用意した。被験者は 20 代の男女 20 名であった。

表 2 触覚刺激の種類

	侵入感	通過感
[V1]	有	有
[V2]	有	無
[V3]	無	有
[V4]	無	無

### 3.2 実験内容

今回の実験では、4種の位置覚刺激と4種の触覚刺激を1種ずつ組み合わせた16種の刺激について被験者に評価をさせた。

まず、被験者による刺激の評価の方法を説明する。評価の基準は、「自分の手で対象物体に触れているように感じるか」とした。被験者による評価の記入は、被験者が数直線上においてそれぞれの刺激に当てはまると考えた評価値の位置にプロットさせることで行われた。このとき数直線上に目盛は無く、絶対的な数値表現ではなく、他の刺激との相対的な数量比較を行われた。

次に、実験の手順を説明する。まず初めに、被験者に対して本実験の目的・内容・評価の基準・評価の記入方法を記入例を含む文書と口頭で説明した。続いて、被験者に一通りの刺激を体験させ、適当な基準となる評価値を決めさせた。その後、被験者に左手でのキーボード入力により自由にすべての種類の刺激を体験させ、すべての刺激の評価を行われた。これを2種の対象物体(山型、箱型)に対して行った。また、実験の最後に実験や刺激に対する意見や感想を聞いた。図8は被験者実験の様子である。

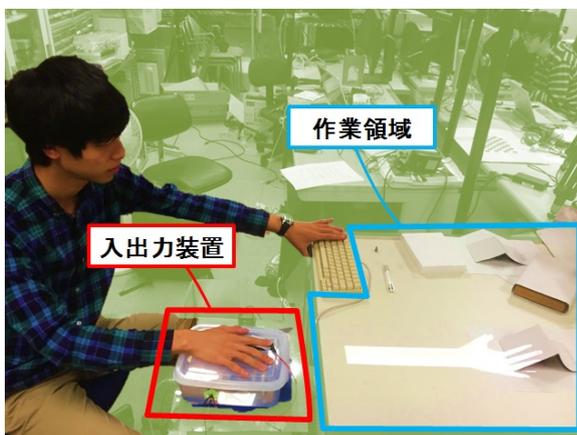


図 8 今回の被験者実験の様子

### 3.3 結果と考察

得られたデータを用いて分散分析を行った結果、各位置覚刺激間と各触覚刺激間には有意差が見られたが、位置覚刺激と触覚刺激の間の交互作用には有意差が見られなかった。

そこで、それぞれの組み合わせの刺激に対してサーストンの一対比較法を用いて各刺激の評価を行った。表3は、

実験で得られたデータをサーストンの一対比較法によって評価した結果である。

まず、山型に対する結果について考える。表より、位置覚刺激 [S4] 及び触覚刺激 [V4] を含む場合、つまり位置覚刺激または触覚刺激が呈示されない場合は、評価が低いことが分かる。またそのような場合以外を比較すると、以下のようなある程度の傾向が見られた。

- 触覚刺激 [V1][V2] は触覚刺激 [V3] よりも評価がよい
- 触覚刺激 [V1] は触覚刺激 [V2] よりもわずかに評価がよい
- 触覚刺激 [V1][V2] を呈示する場合は位置覚刺激 [S2][S3][S1] の順に評価がよい
- 触覚刺激 [V3] を呈示する場合は位置覚刺激の評価の順番が逆になる

これらの結果と実験中に得られた意見や感想から考察を行った。[V1][V2] の触覚刺激を呈示する場合は、全ての位置覚刺激を呈示する [S1] よりも高さや傾きのみを呈示する [S2] の評価が高く、次いで [S3] の評価が高い。また逆に、[V3] の触覚刺激を呈示する場合は [S2][S3] よりも [S1] の評価が高くなっている。また、[V1][V2] の差が小さいことから、通過感の刺激は侵入感の刺激に比べて影響が非常に小さいと考えられる。したがって、影響が小さい通過感のみが呈示される [V3] の場合には、より多くの情報を持つ [S1] の評価が高く、次いで [S2][S3] と高くなっており、影響が大きい侵入感が呈示される [V1][V2] の場合には、高さや傾きといった単純な刺激のみを呈示する位置覚刺激 [S2][S3] の評価が高くなっている。このことから、山型のような物体に触る場合は、あまりにも呈示される情報が多いことをユーザが好まないのではないかと推測できる。ただし今回の場合は、侵入感・通過感の呈示のどちらにも振動子を用いたため、似た刺激に対する重要度が下がってしまったとも考えられる。

次に、箱型に対する結果についても同様に考える。表を見ると、基本的には位置覚刺激 [S4] 及び触覚刺激 [V4] を含む場合は評価が低いことが分かる。またそのような場合以外を比較すると、以下のようなある程度の傾向が見られた。

- 触覚刺激 [V2][V3] は触覚刺激 [V1] よりも評価がよい
- 触覚刺激 [V1][V2][V3] を呈示する場合は位置覚刺激 [S1][S2][S3] の順に評価がよい

これらの結果と実験中に得られた意見や感想から考察を行った。山型の時とは異なり、位置覚刺激については呈示される刺激の種類が多いほど評価が高くなっている。また、同じ位置覚刺激の中では [V1] の評価が低くなっている。このことから、箱型のような物体に触る場合は、位置覚刺激については呈示される刺激の種類が多い方が好まれ、触覚刺激の呈示は単純なものが好まれると推測される。

これらのことから、ユーザは同じような刺激に対する指先の触覚による識別能力は高くなく、刺激の種類が多けれ

表 3 サーストンの一対比較法による評価

組み合わせ	山型	箱型
[S1][V1]	-0.416	-0.726
[S1][V2]	-0.540	-0.758
[S1][V3]	-0.407	-0.762
[S1][V4]	-0.209	-0.410
[S2][V1]	-0.847	-0.453
[S2][V2]	-1.040	-0.644
[S2][V3]	-0.355	-0.536
[S2][V4]	-0.014	-0.205
[S3][V1]	-0.653	-0.256
[S3][V2]	-0.710	-0.442
[S3][V3]	-0.216	-0.356
[S3][V4]	0.189	-0.156
[S4][V1]	0.523	0.770
[S4][V2]	0.990	1.264
[S4][V3]	1.014	0.943
[S4][V4]	2.084	1.970

ば多いほど良いわけではないと言える。今回の評価は少数の被験者に対してしか行っていないことと触覚刺激も振動に限定しているため、十分な人数に対して行った場合や他の種類の触覚刺激を用いた場合は変わる可能性はあるが、今回の結果が絶対的なものであるとすると、山型のように斜面や稜線を持つ物体に対しては、折れ曲がりのような複雑な位置覚刺激や複数の触覚刺激を呈示するような刺激は適切な刺激であるとは言えない。また、箱型のように作業面と水平もしくは垂直な面のみから構成される物体に対しては、高さのみなどの単純な位置覚刺激や複数の触覚刺激を呈示するような刺激は適切な刺激であるとは言えない。したがって、様々な形状に対応するためには、高さ・傾き・侵入感といった3種類程度の刺激を呈示するのがよいと考えられる。実用的なシステムを考えるとコスト面も考える必要があり、高さと侵入感のみの呈示によっても十分に体性感覚を刺激することが可能であると考えられ、経済的及び空間的ともにコストパフォーマンスに優れていると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、新たに侵入感・通過感を呈示する触覚フィードバック機構を組み込んだ実験用システムを構成し、高さ・傾き・折れ曲がり呈示する位置覚刺激4種類と体性感覚のうち、侵入感・通過感を呈示する触覚刺激4種類を組み合わせた16種類の刺激に対して、被験者実験を通して評価を行った。その結果、ユーザは同じような刺激に対する指先の触覚による識別能力は高くなく、刺激の種類が多ければ多いほど良いわけではなく、高さ・傾き・侵入感といった3種類程度の体性感覚刺激を呈示するのがよいということが示唆された。また、実用的なシステムを考えるとコスト面も考える必要があり、高さと侵入感のみの呈示によ

ても十分な刺激が呈示可能であると考えられ、金銭的及び空間的コストパフォーマンスに優れていると考えられる。今後は、侵入感の呈示の際にユーザの指に実際に物体が接触するような機構を、通過感の呈示の際に摩擦を呈示する機構を組み込んだシステムを実装し、新たに実験を行う。

#### 参考文献

- [1] 新明拓也, 岩井大輔, 佐藤宏介, " 距離画像計測に基づき触覚フィードバックを付与する投影型上腕拡張ユーザインタフェース", 第58回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCT' 14), 115-4, 2014.
- [2] 新明拓也, " 身体拡張型ユーザインタフェースにおける触覚フィードバックによる拡張感への影響の調査", 情報処理学会第77回全国大会講演論文集, 発表番号4ZA-07, p. 4-311, 2015
- [3] 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, p. 349-355, 2014.
- [4] Pfeiffer, Max, and Wolfgang Stuerzlinger. " 3D Virtual Hand Selection with EMS and Vibration Feedback." Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2015.
- [5] Kim, Keehoon, and JEdward Colgate. " Haptic feedback enhances grip force control of sEMG-controlled prosthetic hands in targeted reinnervation amputees." Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on 20. 6, p. 798-805, 2012.