



# バーチャルハンドの接触における視触覚間の空間的距離・感覚野的距離が身体所有感に及ぼす効果

Effects of Spatial and Sensory Field Distance between  
Visual and Haptic Stimuli on Sense of Ownership for Virtual Hand Contact

亀岡嵩幸<sup>1)</sup>、蜂須拓<sup>1)</sup>

Takayuki KAMEOKA and Taku HACHISU

1) 筑波大学 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, kameoka, hachisu@ah.iit.tsukuba.ac.jp)

**概要:** ハンドラッキング機能を備えたヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いたハンズフリーなバーチャルリアリティ (VR) 体験の普及に伴い、バーチャル空間上でのユーザの手指 (バーチャルハンド) と物体の接触に対する触覚刺激の提示方法の確立はハプティクス研究分野の課題の一つである。我々はバーチャルハンドの接触に対して HMD に内蔵した装置より顔面へ機械刺激を提示する手法を設計・開発してきた。本稿では、このような視触覚での刺激の提示位置の空間的非整合性がユーザーのバーチャルハンドに対する身体所有感に及ぼす影響を評価する実験システムの開発と予備実験の結果について報告する。バーチャルハンドの指先でタッチパッドを操作するタスクにおいて、パッド接触時の振動刺激の提示位置に対する所有感を評価した。その結果、所有感は空間的な指先から提示位置の距離よりも一次体性感覚野的な距離において強い負の相関が観られた。本結果は少ない参加者数の予備的な結果であるが、上記のような VR や感覚義手のように本来提示すべき部位とは異なる部位へ触覚刺激を提示する装置の設計・開発に貢献する知見となりうる。

**キーワード:** ヘッドマウントディスプレイ、バーチャルハンド錯覚、一次体性感覚野

## 1. はじめに

ハプティクス研究分野の課題の一つに、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を介したバーチャルリアリティ (VR) 体験中のユーザに対する VR 体験の質を向上させるための効率の良い触覚刺激の提示手法の開発が挙げられる。HMD の低価格化に伴い HMD を用いた VR 体験の需要は高まっている。特に消費者向け HMD は取り扱いの容易さに関する需要が大きく、外部端末を必要としないスタンドアロン型が主流となっている。物理空間上のユーザの手指の運動をバーチャル空間上のそれに反映させるために従来利用されてきたハンドヘルド型コントローラに関しても光学式ハンドトラッキング技術の搭載により不要となる傾向がある。このようなハンズフリーな状況において、特にバーチャル空間上でのユーザの手指 (バーチャルハンド) と物体の接触に対してどのように触覚刺激を提示するべきであろうか。

我々はこれまでにバーチャルハンドの接触に対して HMD から顔面へ機械的刺激を提示することで VR 体験の質を高める触覚刺激の提示手法に関する研究に取り組んできた [1]。本手法は感覚義手にも用いられる本来提示すべき部位 (の触覚受容器が残存しないため) とは異なる部位へ触覚刺激を提示する手法 [2,3] に着想を得たものである。顔面は HMD に搭載した素子より刺激可能であるだけでなく、指先との空間的な距離においては手首等より大きい一方で一次体性

感覚野 (感覚野的な距離) において小さい [4]。しかし、空間的または感覚野的な距離が VR 体験に及ぼす影響は不明である。

本研究では、バーチャルハンドの接触を対象に視触覚間の刺激部位の空間的または感覚野的な距離が VR 体験に与える影響を明らかにすることを目的とする (図 1)。本稿では、VR 体験の質としてバーチャルハンドに対する身体所有感に着目し、視触覚間の空間的または感覚野的な距離が及ぼす影響を評価するシステムの開発と予備実験の結果について報告する。

## 2. 関連研究

### 2.1 バーチャルハンド錯覚

ラバーハンド錯覚は体験者の腕を隠し、ゴムの腕を見せながらそれぞれの腕へ同時に触覚刺激を与えると、体験者がゴムの腕を自身の腕であるかのように感じる現象である。この感覚は身体所有感と呼ばれ [5]、特にゴムの腕の代わりにバーチャルハンドを用いる場合はバーチャルハンド錯覚と呼ばれる [6]。

身体所有感の評価には質問紙が用いられる [7]。各質問は項目 (所有感、比較質問、非所有感) ごとに複数の質問が用意され、Visual Analog Scale (VAS) で回答する。またバーチャルハンド錯覚の生起には、触覚刺激と視覚刺激の

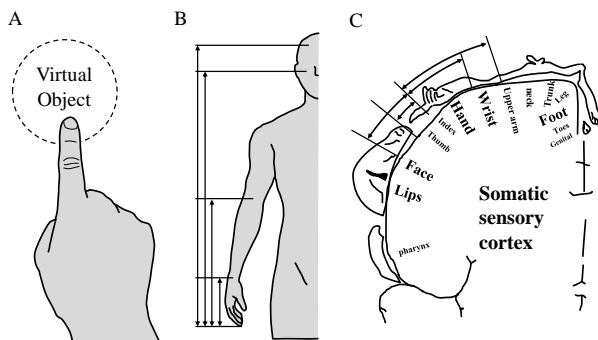


図 1: バーチャルハンドとバーチャルオブジェクトの接触 (A) における指先と触覚刺激提示部位の空間的な距離 (B) および感覚野的な距離 (C、[4] を参考に著者作成)

時間的同期が重要であると報告されている [6]。一方で、著者の知る限り両刺激の空間的整合性に関する知見は少ない。

## 2.2 VR 環境における指先触覚の代替提示

視触覚間で刺激が空間的に不一致であってもバーチャルハンド錯覚が生じることが示唆されている。バーチャルハンドの接触等に対して体験者の前腕 [8] や背部 [9] に触覚刺激を提示する視触覚間で空間的に不一致な提示手法が開発されている。特に、Ichinose らは切断または感覚が麻痺した前腕と同側の頬を振動刺激することで前腕の幻肢痛が軽減されることを報告している [10]。これは手指と頬は感覚野的な距離 (図 1C) が近いことに由来すると考えられ、身体所有感においても感覚野的な距離が影響を及ぼすことを示唆する。一方で、バーチャルハンド錯覚における空間的または感覚野的な距離が身体所有感に及ぼす影響は明らかでない。

## 3. 実験

本実験では、バーチャルハンドとバーチャルオブジェクトの接触に対して触覚刺激を提示する身体部位の手指からの空間的または感覚野的な距離がバーチャルハンド錯覚に及ぼす影響を検証することを目的とする。

### 3.1 システム構成

本システムをホストコンピュータ、HMD (Meta Quest2、Meta Platforms)、振動子 (LD14-002、ニデックプレジジョン株式会社)、制御回路、ノイズキャンセリングヘッドホン (WH-1000XM5、SONY)、およびキーボードより構成した。

コンピュータはゲームエンジン (Unity) より生成した三次元バーチャル空間を HMD を介して視覚刺激の提示を行った。図 3 に示すようにバーチャル空間にはバーチャルハンド (右手) および 3×3 のタッチパッドを配置した。また実験の手続きに応じて、タスク開始パッドや VAS、リッカートスケールを表示した。VAS およびリッカートスケールはキーボードより回答するようにした。バーチャルハンドの位置および姿勢の制御は HMD に内蔵されたハンドトラッキング機能を利用した。各パッドの縦×横×奥行を 4×4×1 cm とした。コンピュータはバーチャルハンドとパッドの接触を検知すると制御回路を介して振動子に周波数 150 Hz の

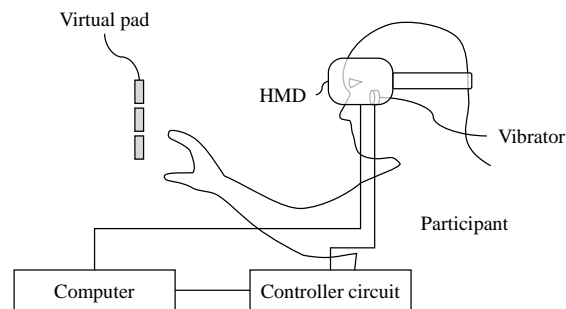


図 2: システム構成

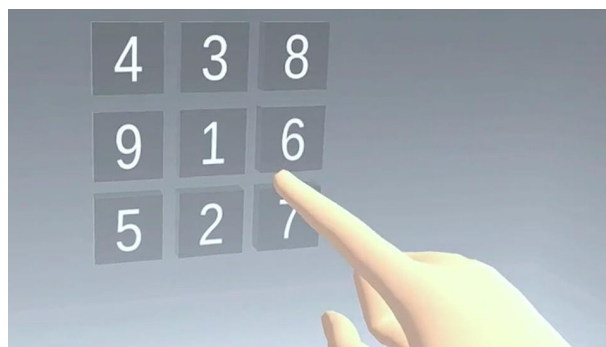


図 3: バーチャル空間：タッチパッドおよびバーチャルハンド

矩形波を 60 ミリ秒間入力して駆動した。振動子は次節で述べる提示位置にベルクロで固定した。

### 3.2 設計

本実験では、実験参加者にバーチャルハンドでランダムに重複なくパッドに割り当てられた 1 から 9 の数字を素早く昇順に触れるタスクを課した。この際、触覚刺激の提示位置 (振動子の固定位置) として 6 水準 (人差指指腹 (指先)、手首、上腕、頬、額、触覚刺激なし) を設定した。ただし、いずれもバーチャルハンドと同側 (右側) とした。タスクの遂行時間はバーチャルハンドとタスク開始パッドが接触した時刻からバーチャルハンドと 9 のパッドが接触した時刻とした。質問紙は [7] を参考にバーチャルハンド錯覚に関する 9 項目 (Q1-Q3: 所有感、Q4-Q6: 比較質問、Q7-Q9: 非所有感) および VR 体験の質に関する 2 項目 (Q10-Q11) を設定した (表 1)。前者を VAS (-100: 全くそう感じない、+100: とてもそう感じる)、後者を 7 段階リッカートスケール (1: とても悪い、7: とても良い) で回答させた。

### 3.3 手続き

3 名の男性 (22 歳) が同意の下、本実験に参加した。まず、実験参加者に机の前に着席し、HMD、ノイズキャンセリングヘッドホンを着装するよう指示した。実験中にノイズキャンセリングヘッドホンよりホワイトノイズを流し、聴覚の手掛かりを排除した。次に、各触覚刺激の提示位置条件下でバーチャルハンドでタスク開始パッドに触れた後、タスクを 5 回遂行するように指示した。ただし、順番通りに触れられなかった場合は遂行したとはみなさなかった。各

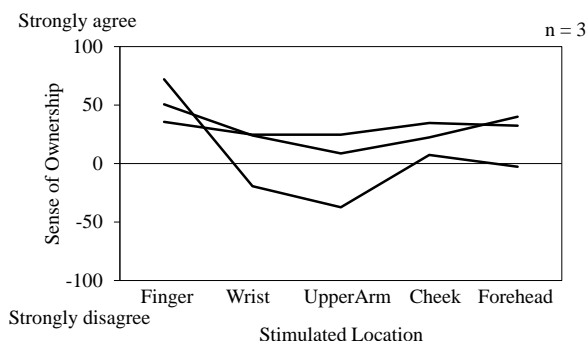


図 4: 空間的な距離（順序尺度）に対する所有感の評価値

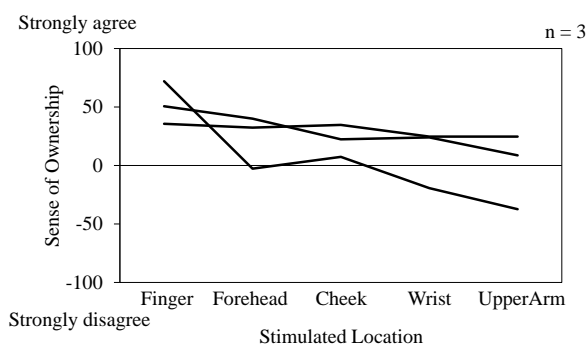


図 5: 感覚野的な距離（順序尺度）に対する所有感の評価値

タスク遂行後に質問紙に対して回答するよう指示した。提示位置条件の順は最初に触覚刺激なし（VisionAlone）条件とし、以降は実験参加者ごとにランダムとした。

全ての提示値条件でのタスク遂行および質問紙への回答の終了後、実験参加者に自由にコメントを回答させ実験を終了した。

### 3.4 結果と考察

本節では所有感および VR 体験の質についてのみ述べる。

所有感の評価値として、各参加者の各提示位置条件において Q1 から Q3 の 5 回目の回答の平均値を計算し、視覚のみ（VisionAlone）条件の評価値との差分を算出した。結果を図 4 および図 5 に示す。ただし、横軸は図 1B および C の空間的および感覚野的な距離を順序尺度としたものを、縦軸は所有感の評価値を示す。

感覚野的な距離の図（図 5）においてより大きい負の相関が観られる。したがって、本来刺激を提示すべき部位（指先）と異なる部位へ刺激を提示する状況において、空間的な距離よりも感覚野的な距離が所有感の低下に影響することが示唆された。特に、空間的な距離が小さく感覚野的な距離が大きい手首と上腕における所有感の低下は本結果を支持する。一方で、本結果は上腕の振動刺激に対する比較的低い感度が原因である可能性も考えられる [11]。本実験においては触覚刺激の強度を統制するために同様の振動刺激を用いたが、参加者から上腕への刺激は知覚しにくかったという意見があった。これが上腕における所有感の低下の原因となったことが考えられる。

VR 体験の質の評価として、各参加者の各条件における 5

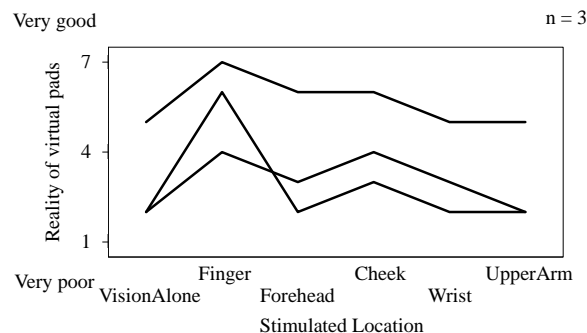


図 6: 感覚野的な距離（順序尺度）に対するバーチャルパッドのリアリティの評価値

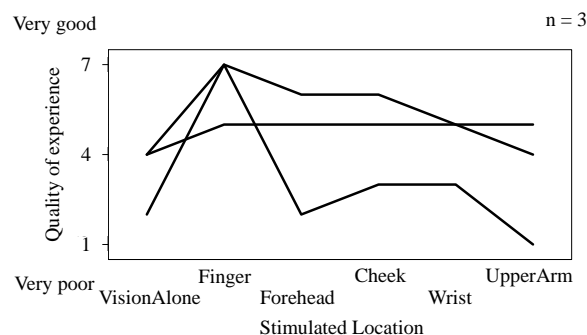


図 7: 感覚野的な距離（順序尺度）に対する VR 体験の質の評価値

回目の回答を図 6 および図 7 に示す。ただし横軸は感覚野的な距離を順序尺度としたものを、縦軸はバーチャルパッドのリアリティおよび VR 体験の質の評価値を示す。いずれの参加者においても指先で最も評価値が高くなった。これは視触覚間において刺激が空間的に整合していたためと考えられる。次いで頬で評価値が高く、空間的な距離が小さい手首および感覚野的な距離が小さい額と同等以上となった。一方で、上腕では評価値が低く、ほぼ触覚刺激なしと同等であった。身体所有感の結果と同様に上腕部の振動刺激に対する低い感度が影響した可能性が考えられる。

## 4. おわりに

本稿では、バーチャルハンドの接触に対する触覚刺激の提示位置の空間的非整合性がバーチャルハンド錯覚の生起に及ぼす影響を評価する実験システムの開発と予備実験について報告した。その結果、所有感は提示位置から指先までの空間的な距離よりも感覚野的な距離において強い負の相関が観られた。

今後は本予備実験を基に提示位置や質問紙等の実験設計を見直し、参加者数を増やして統計的に本結果の妥当性を検証する。また、本実験で得られた知見を HMD に内蔵可能な触覚提示装置の設計に活用し、触覚提示機能を有する簡便な VR 体験の実現を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20K20627 および 20J23626、JST、CREST、JPMJCR22P4 の支援を受けたものです。

表 1: 所有感および VR 体験の質を評価する質問紙

Category	Question item
所有感	Q1. 自分の手を見ているように感じた
	Q2. バーチャルな手が身体の一部のように感じた
	Q3. タッチパッドに直接触れたような気がした
比較質問	Q4. 手が複数あるように感じた
	Q5. 本物の手がバーチャルな手になったように感じた
	Q6. 自分の手やバーチャルな手以外のものでタッチしたように感じた
非所有感	Q7. 自分の手が消えたように感じた
	Q8. 自分の手がどこにあるかわからなくなった
	Q9. 自分の手を動かさないように感じた
VR 体験の質	Q10. タッチパッドのリアリティ (1:まったくない~7:とてもある)
	Q11. 体験全体の質 (1:とても悪い~7:とても良い)

## 参考文献

- [1] T. Kameoka, Y. Kon, T. Nakamura and H. Kajimoto: “Haptopus: Haptic VR experience using suction mechanism embedded in head-mounted display”, *UIST 2018 Adjunct - Adjunct Publication of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (2018).
- [2] C. Antfolk, M. D’Alonzo, M. Controzzi, G. Lundborg, B. Rosen, F. Sebelius and C. Cipriani: “Artificial Redirection of Sensation From Prosthetic Fingers to the Phantom Hand Map on Transradial Amputees: Vibrotactile Versus Mechanotactile Sensory Feedback”, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **21**, 1, pp. 112–120 (2013).
- [3] G. Shi, E. Peperoni, C. M. Oddo, M. Li, J. Hardwicke, M. Venus, S. Homer-Vanniasinkam, H. A. Wurdemann, A. Palombi, Z. Lim, A. Astolfi, A. Burani, S. Campagnini, F. G. C. Loizzo, M. L. Preti, A. M. Vargas, E. Peperoni, C. M. Oddo, M. Li, J. Hardwicke, M. Venus, S. Homer-Vanniasinkam and H. A. Wurdemann: “Fluidic Haptic Interface for Mechano-Tactile Feedback”, *IEEE Transactions on Haptics*, **13**, 1, pp. 204–210 (2020).
- [4] W. Penfield and T. Rasmussen: “The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function”, *Journal of the American Medical Association*, **144**, 16, pp. 1412–1412 (1950).
- [5] M. Tsakiris: “My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership”, *Neuropsychologia*, **48**, 3, pp. 703–712 (2010).
- [6] K. Ma and B. Hommel: “The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion”, *Consciousness and Cognition*, **36**, pp. 277–288 (2015).
- [7] M. Pyasik, G. Tieri and L. Pia: “Visual appearance of the virtual hand affects embodiment in the virtual hand illusion”, *Scientific Reports* 2020 10:1, **10**, 1, pp. 1–11 (2020).
- [8] T. Moriyama and H. Kajimoto: “Wearable Haptic Device Presenting Sensations of Fingertips to the Forearm”, *IEEE Transactions on Haptics*, **15**, 1, pp. 91–96 (2022).
- [9] T. Moriyama, H. Asazu, A. Takahashi and H. Kajimoto: “Simple is vest: High-density tactile vest that realizes tactile transfer of fingers”, *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA 2019, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, Inc, pp. 42–43 (2019).
- [10] A. Ichinose, Y. Sano, M. Osumi, M. Sumitani, S.-I. I. Kumagaya and Y. Kuniyoshi: “Somatosensory Feedback to the Cheek During Virtual Visual Feedback Therapy Enhances Pain Alleviation for Phantom Arms”, *Neurorehabilitation and neural repair*, **31**, 8, pp. 717–725 (2017).
- [11] L. A. Pardo, M. Markovic, A. F. Schilling, M. A. Wilke and J. Ernst: “Vibrotactile mapping of the upper extremity: Absolute perceived intensity is location-dependent; perception of relative changes is not”, *Frontiers in Neuroscience*, **16**, p. 958415 (2022).