

VR 空間における視触覚運動統合に関する研究

野坂芳宗
大山潤爾
横澤一彦

日本国際学園大学経営情報学部
国立研究開発法人産業技術総合研究所
日本国際学園大学経営情報学部

局所的な視覚運動情報から物理的運動方向が特定できない「窓問題」が知られているが、これは物理的運動方向とは異なる、いわば窓錯覚が生じていることになる。この窓錯覚が、視覚運動だけでなく、触覚運動でも生起するのか、さらに視触覚運動統合が生起するのかについてはまだ十分に検討されていない。そこで本研究では、HMD とリニアアクチュエータを用いた VR 実験環境を構築し、視覚的にも触覚的にも窓錯覚が生じる可能性がある斜縞の実験刺激に対して知覚された運動方向を回答させる実験を実施した。実験の結果、斜縞の触覚刺激に対して物理的運動方向とは異なる窓錯覚が、視覚刺激と同様に生起することが分かった。また、視触覚運動方向の統合は確認されず、運動方向の知覚における触覚の優位性が示された。これらの結果は、視触覚運動情報の一致度を操作することで、VR 空間における視覚運動と触覚運動の局所的統合性を明らかにしている。

問題・目的

五感は脳内で統合され、特に視覚と触覚の相互作用は、現実感のある知覚像を形成する上で重要な役割を果たしている。視覚情報処理においては、局所的な運動情報から真の移動方向を決定できない「窓問題」に基づき、運動方向に誤認が生じる「窓錯覚」が知られており、触覚においても同様の現象が生じることが報告されているが(Pei, Hsiao, & Bensmaia, 2008)、視覚情報との相互作用については、これまで十分な検証が行われてこなかった。

視触覚情報の統合によって生じるラバーハンド錯覚は、自己の身体表象の変容現象である(Botvinick & Cohen, 1998)。すなわち、身体所有感が単一の感覚ではなく、視触覚統合により形成されることが考えられる(金谷、横澤, 2015)、典型的な実験操作では、視触覚情報が同期運動情報であることは注目すべきだろう。

本研究では、VR技術を用いて視覚と触覚の刺激を動的に操作し、視覚情報と触覚情報の相互作用や統合過程を検証することを目的とした。具体的には視触覚情報を呈示した際に、触覚刺激に対する窓錯覚が生じたときの視覚刺激の影響の有無と、視触覚刺激の運動方向がベクトル和として統合された新たな運動知覚が生起するのかについて検討した。

方法

実験参加者 正常な視力または矯正視力を有した男性17名、女性7名(18歳~39歳、平均年齢24.8歳)。実験の目的について事前知識を有していない実験参加者を心理実験参加サイトより募集した。

実験刺激 触覚刺激は木製の細長い竹ひごを配置し縞模様触覚刺激を4種類、すなわち水平方向、垂直方向、右下-左上、左下-右上を用意した。(図1)。

視覚刺激は触覚刺激の動作している状態でそれぞれの刺激を右方向と左方向で撮影し、彩度が可能な限り統一になるよう編集されたものを使用した。

VR空間内での呈示には背景が黒一色の大きな長方形の2D画像内に設けられ円形開口部を介して呈示された。円形開口部は長方形の中央付近に配置されたため、黒い背景による視野が制限された状態で実験参加者に呈示された。視覚刺激と触覚刺激を組み合わせた32種類の刺激を使い、各参加者に32試行実施した。



図1 縞模様触覚刺激例(左下-右上)

装置 HMD(VIVE Pro eye)、トラッカー(VIVE Tracker) 5つ、VR対応PC(Alienware15, Dell, NVIDIA GeForce RTX 4080)。VR空間、3Dモデル及びアバターはXperigrapher (Ohyama, 2021)を用いて制御された(図2)。アバターは身長160cmの日本人女性と、身長170cmの日本人男性のものを男女で使い分けた。

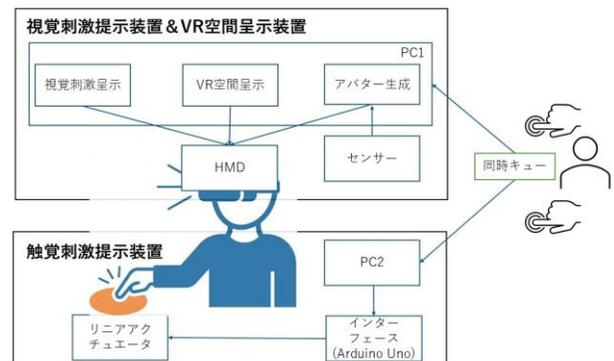


図2 視覚刺激呈示装置と触覚刺激装置

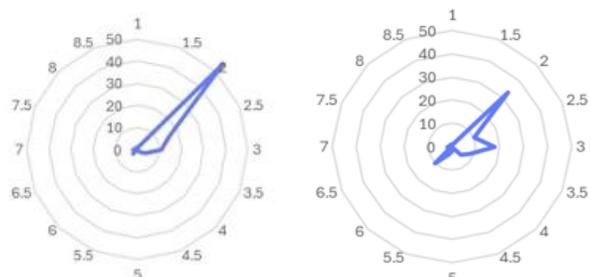
触覚刺激の呈示には、Arduino Unoで制御されたリニアアクチュエータを使用した。リニアアクチュエータにより一定方向への往復運動を可能にし、受動的な触覚刺激を再現した。Arduinoは制御プログラムに基づいてモータードライバを介してリニアアクチュエータを制御し刺激の運動方向、動作のタイミングを調整した。視覚刺激の開始キューと触覚刺激の開始キューは実験者による手動で行われた。また、手動キューが行われた後、視覚刺激部分が3秒間ブラックアウトし、10秒間刺激が呈示され触覚刺激は16秒間一定方向に動き続けるため同期性が保たれた(図2)。

デザイン 運動方向(一致、不一致)×縞の向き(同斜縞、直交斜縞、同方位縞、直交縞)の2要因。

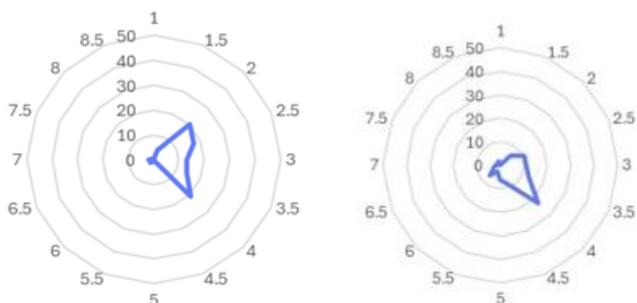
手続き 実験参加者は両手足と腹部に計5つのトラッカーを装着し、HMDを装着後のアバターを身体に合わせるキャリブレーション(T字ポーズ)を行った。右手の人差し指・中指・薬指の3本を固定した状態で触覚刺激に触れ、聴覚キューを合図に10秒間の刺激呈示(視覚・触覚)を受けた。刺激呈示後、回答用画像に基づき、運動方向を16方向から口頭で回答した。

結果と考察

視触覚運動方向の同一性と視触覚呈示縞の同一性に基づいて、刺激グループ毎に24人の実験参加者の回答結果をレーダーチャートに結果をまとめた。図3にその一部を示す。



(左：同運動・同斜縞刺激グループの結果
右：逆運動・同斜縞刺激グループの結果)



(左：同運動・直交斜縞刺激グループの結果
右：逆運動・直交斜縞刺激グループの結果)

図3 実験結果のレーダーチャートの例

実験結果をまとめると、斜縞を用いた条件では、物理的な運動方向とは異なる方向への回答の偏りが顕著に認められた。すなわち、触覚刺激である斜縞の垂線方向に回答されがちであることが明らかになった。これは、斜縞方向に起因する運動方向知覚において、触覚でも窓錯覚が生起し、実際の物理的運動方向とは異なる方向に判断された結果である。この結果は、斜縞刺激に対する運動方向知覚において、物理的に正確な運動方向知覚が困難であることが明らかになった。また、視覚情報が、運動方向知覚に影響を与えていた。一方、窓錯覚が生じない水平・垂直方位縞条件では、物理的な運動方向が回答されていることを確認した。

以上の結果から、以下のように考察する。

まず、触覚における「窓錯覚」の生起について、斜縞刺激を用いた際に物理的な運動方向とは異なる知覚の偏りが顕著に認められ、視覚の窓問題と同様に、触覚においても局所的な触覚情報が縞の運動方向に影響され、運動方向知覚がゆがめられることが明らかになった。

次に、視覚と触覚の相互作用について、視覚情報は触覚による運動判断に影響を及ぼすことが分かった。この結果から両モダリティの相互作用は、視覚情報が触覚情報の解釈を再構成するために機能すると考えられる。

さらに、視覚と触覚の情報の統合について、刺激の一致不一致に関わらず両情報は統合されず、最終的な知覚は主に触覚情報に依存することが分かった。すなわち、視触覚刺激の運動方向がベクトル和として統合されるのではなく、触覚情報の優先的な処理によるものであると判断された。

これらの知見は運動方向知覚の形成過程において、視覚情報が触覚情報の解釈を規定する重要な枠組みになるという感覚間相互作用に関する先行研究の報告を支持する。

本実験の限界として、運動刺激を左右方向のみに限定していたという点がある。今回の結果を一般化するためには、上下や奥行きを伴う3次元的な運動条件下においても同様に視覚と触覚の相互作用が成立するか、今後さらなる検討が必要である。

引用文献

- Pei, Y. C., Hsiao, S. S., & Bensmaia, S. J. (2008). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105, 23, 8130-8135.
- Botvinick, M. & Cohen, J. (1998). Nature, 391(6669), 756.
- 金谷、横澤(2015). バイオメカニズム学会誌, 39, 2, 69-74
- Ohyama, J. (2021). Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering, 811-813.