

2026年3月29日

第一回全国中高生学術審査会「i²」

ラバーハンドイリュージョン、 ヴァーチャルハンドイリュージョンの ヴァーチャルリアリティを用いた拡張

東京大学教育学部附属中等教育学校

山近 晴也

研究背景

VRSNSを遊んでいると必ず耳にするV感。

V感というものは物理的接触が無いのにVR空間での視覚刺激のみで触られたように感じる現象。様々な現象を包括して呼ばれる。

研究目的

V感は複数種類ある。

→自然と生えるV感を仮想身体錯覚と命名。

VR空間内で、自己身体の認識位置を転移させるRHIなどの身体転移錯覚を行うことで、仮想身体錯覚の解明の足掛かりとする。

研究目的

身体転移錯覚は高価な生理計測装置を用いて数値指標するか、質問紙を用いた内観報告での評価が一般的。

研究目的

- ・ 安価で身体転移錯覚の数値指標による評価。
- ・ VR環境で身体転移錯覚を行い、VR環境での身体所有感、運動主体性についての調査を行い、仮想身体錯覚を解明する。

研究方法

ラバーハンドへの身体認識位置のドリフトに目をつけた。

身体所有感とともに身体認識位置も転移している。

RHIの誘起操作を行った左手へ目を瞑った状態で右手を動かすように指示したプレ実験を行った。

研究方法

ランダムな間を置いた後、実験者が拍手を行い、それに合わせて被験者は手を動かすという実験。
実際の左手ではなく、ラバーハンドへ右手を動かすはず。

しかし、実際には実際の左手に動かした。

研究方法

先行研究から、身体所有感の転移に伴う身体認識位置のドリフトは起きてので、手を動かす過程で認識位置を修正してしまうのではないだろうか。

脳幹を通さない脊髄反射なら、修正を行うための遅延が発生するかもしれない。

研究方法

脊髄反射の方法の一つとして聴覚性驚愕反射(ASR)を用いる。

聴覚刺激を提示し、刺激タイミングに合わせてRHIの誘起操作を行った手へ行っていない手を動かす様、指示をする。

この際に、遅延が起きれば身体所有感が転移しているとわかる。

研究方法

低音量での聴覚刺激による反応速度、最大音量での聴覚刺激による反応速度、RHI後の聴覚刺激による反応速度を比べる。

前者は通常時の反応速度、後者はASR時の反応速度を測る。

RHI後の反応速度はASR時の反応速度と同様に最大音量での聴覚刺激を行う。

研究方法

RHIの誘起操作は触覚刺激を10分程度与え続ける。
そのため、RHIの誘起操作前とは異なり、
静止状態の腕を急に素早く動かす必要がある。
それが原因で反応速度が遅延するという可能性もある。

研究方法

遅延は身体認識位置のドリフトによって起きるから、身体認識位置が関係のない場所へ手を動かすように指示した際に遅延するかを見る。

右手を左手の方へ動かすのではなく、右手を前方10cmほどへ動かす様に指示する実験も行った。

実験方法

聴覚刺激の提示、制御、データ記録のための画面点灯を行うWebアプリを自作する。

スタートボタンを押してから3~7秒のランダムな間を置いた後、0.3秒間音を流す。

パソコンの画面と被験者の手が映る画角で60fpsで動画を撮影し、そこから反応速度を測定する。

実験方法

低音量で刺激後、右手を左手に動かす操作を3回。

最大音量で刺激後、右手を左手に動かす操作を3回。

左手を視覚的に遮断し、ラバーハンドのみが見えるように置く。

左手とラバーハンドを約10分間絵筆を用いて空間的、時間的に同期した刺激を与える。

被験者に目を瞑ってもらい、視覚的に遮断していたものを取り外し、最大音量で刺激後、右手を左手に動かす操作を1回行う。

実験方法

前方に動かす実験では、左手へ動かす実験の「右手を左手へ動かす操作」を全て前方へ動かす操作に変更し、他の変更は加えない。

これ以降は左手へ動かす実験を実験1、前方へ動かす実験を実験2と呼ぶ。

結果(実験1)

31人を対象として実験を行った。

数値の個人差が大きく、数値ごとで見ると一貫性がない。

よって、通常の反応速度を基準値とした割合で解析した。

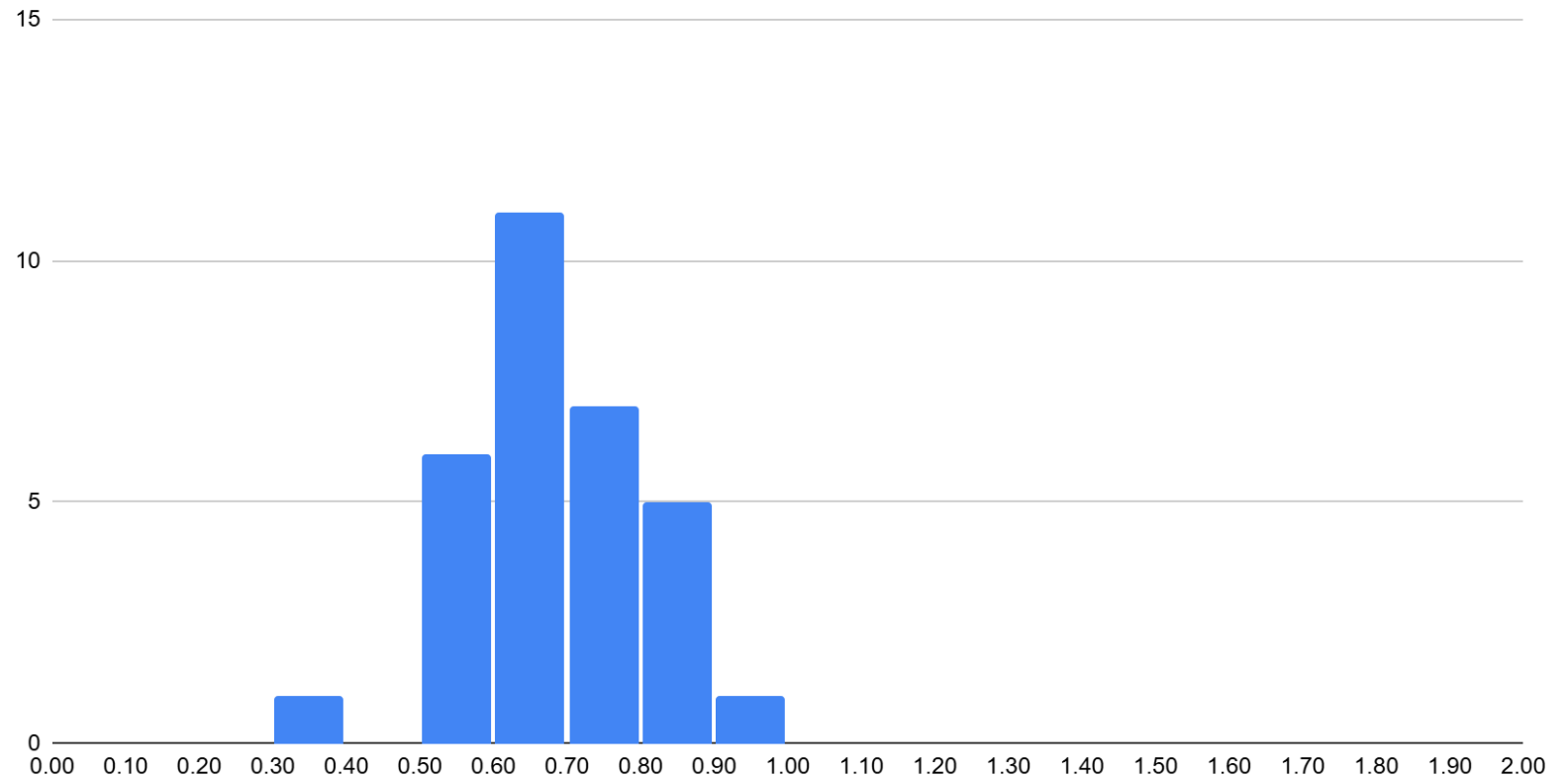
結果(実験1、ASR反射)

平均値 0.69

中央値 0.57

n=31

「驚愕反射」のヒストグラム



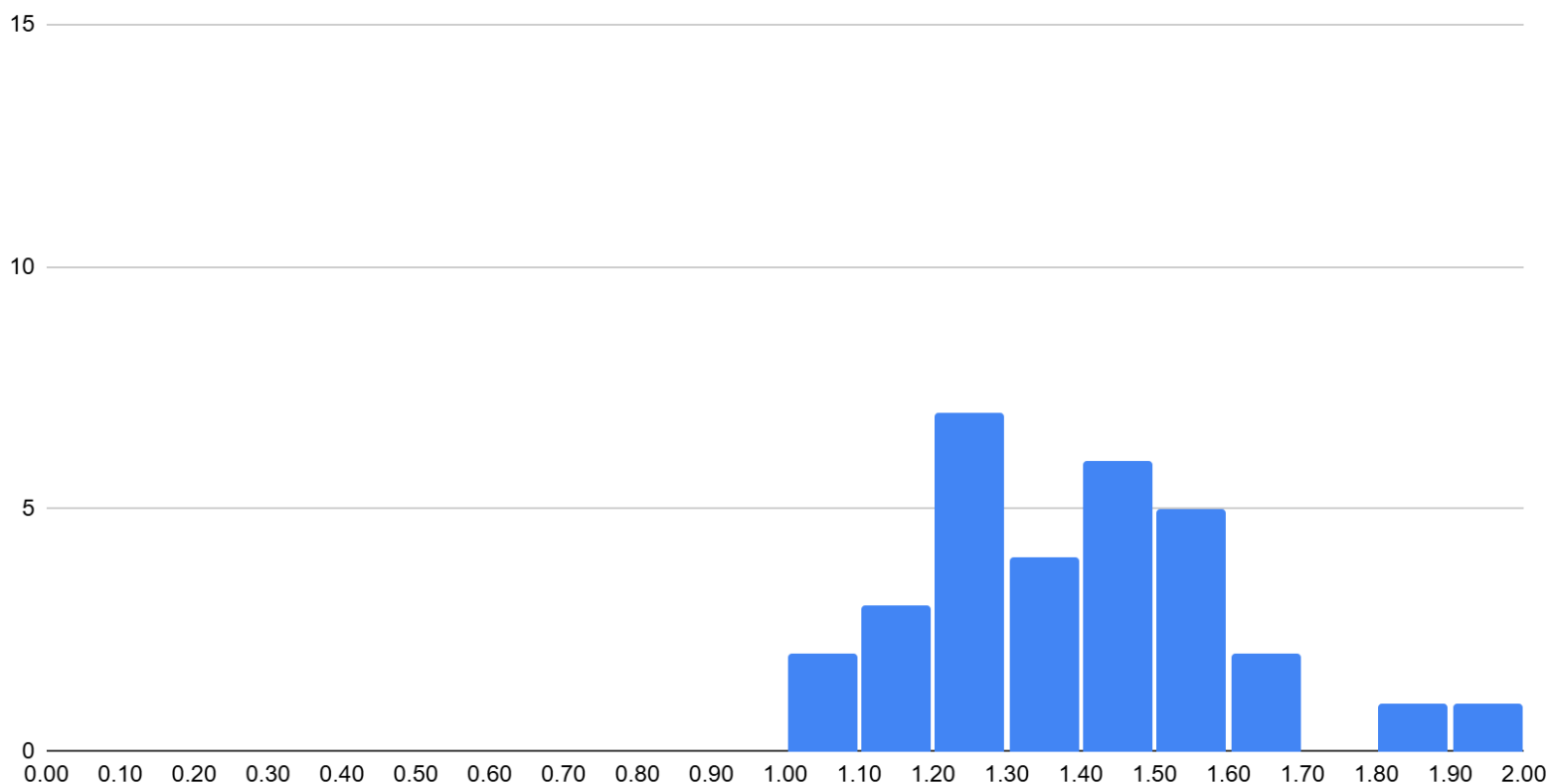
結果(実験1、RHI後の反応)

平均値 1.40

中央値 1.39

n=31

「RHI後」のヒストグラム



結果(実験1)

これら二条件の比率指標について対応のある t 検定を行った結果、両条件間には有意な差が認められた($p < 0.001$)。

ASR反射は数値が全て1未満であるため全ての数値が通常の反応速度よりも早く反応している。

RHI後の反応は数値が全て1より大きいためすべての数値が通常の反応速度よりも遅く反応している。

結果(実験2)

17人を対象として実験を行った。

実験1と同様に、通常の反応速度を基準値とした割合で解析した。



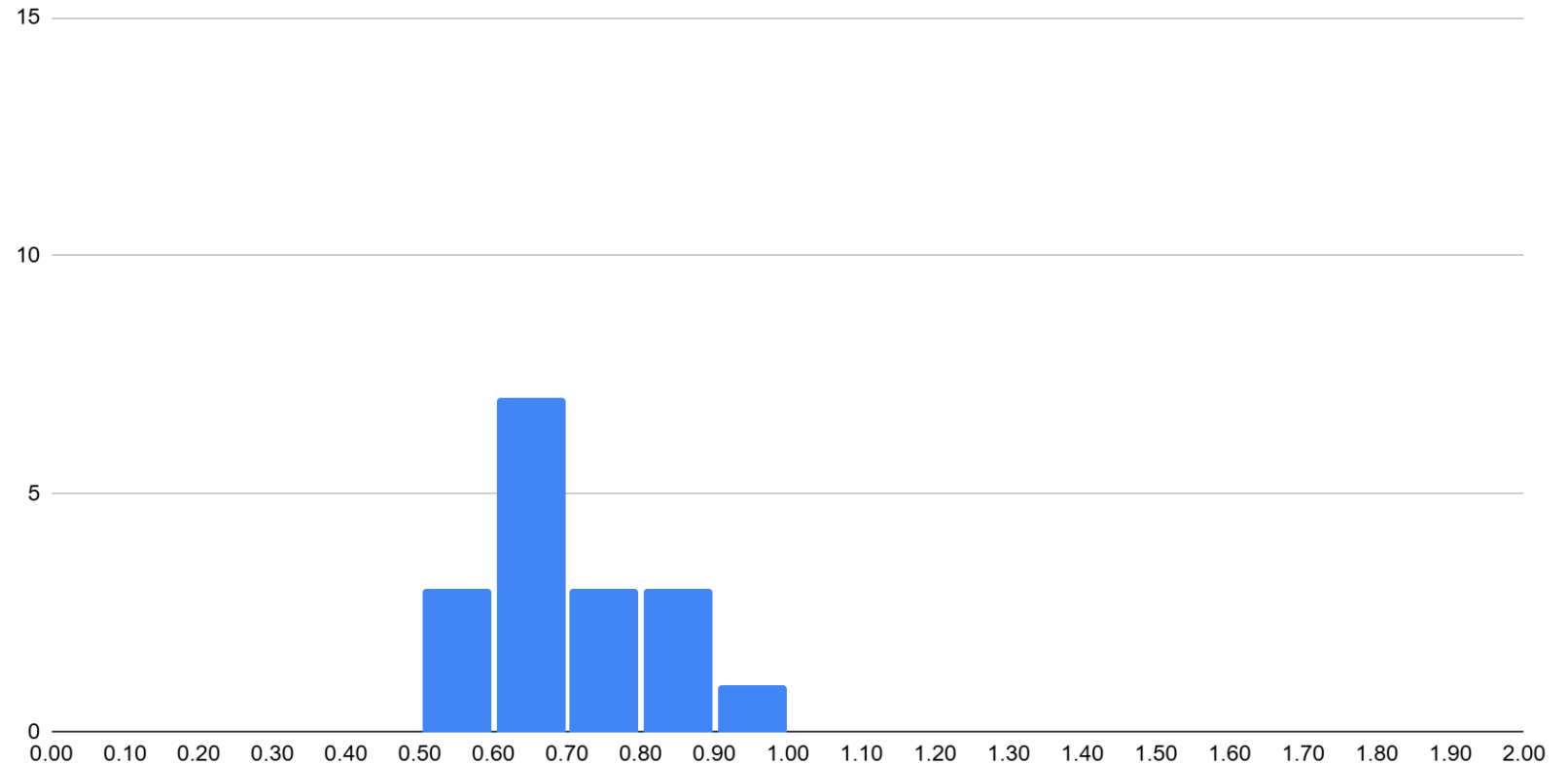
結果(実験2、ASR反射)

平均値 0.71

中央値 0.68

n=17

「実験2驚愕反射」のヒストグラム



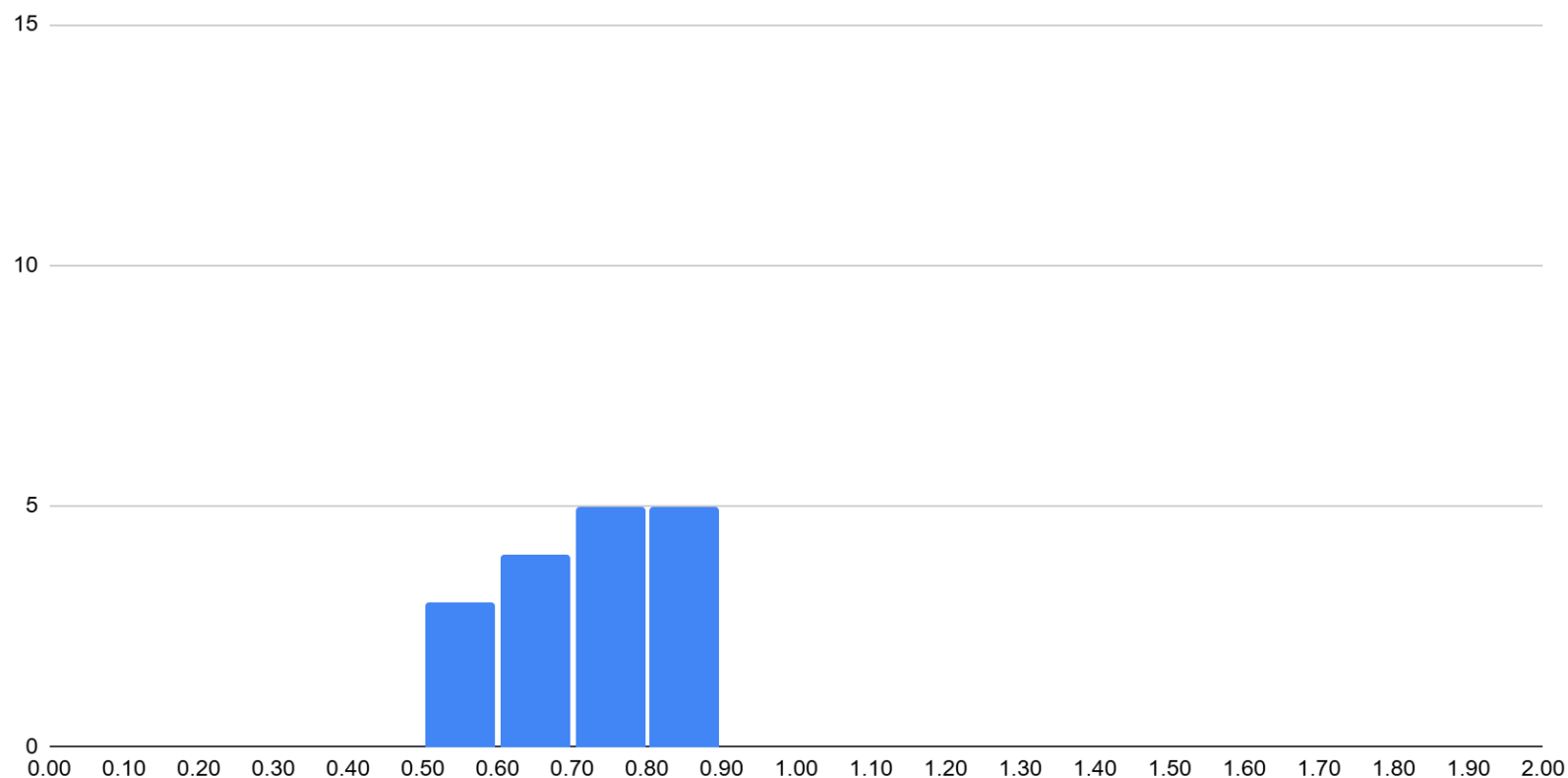
結果(実験2、RHI後の反応)

平均値 0.73

中央値 0.72

n=17

「実験2RHI後」のヒストグラム



実験結果(実験2)

これら二条件の比率指標について対応のある t 検定を行った結果、両条件間には有意な差が認められなかった($p=0.412$)。

ASR反射、RHI後の反応、ともに数値が全て1未満であるため全ての数値が通常の反応速度よりも早く反応している。

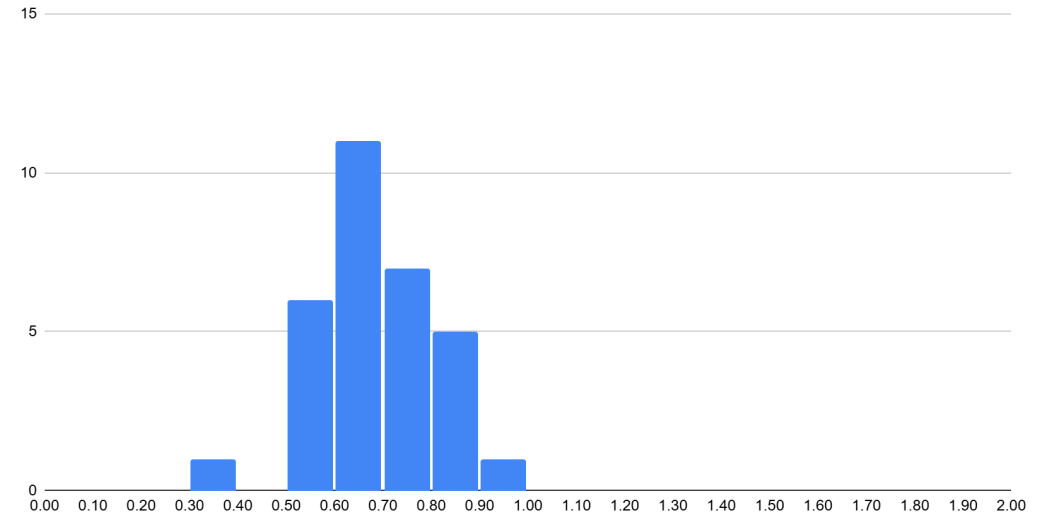
考察

実験1の結果からRHI後に観測された反応速度の変化はASR固有の脊髄反射がそのまま機能した場合とは整合しない。

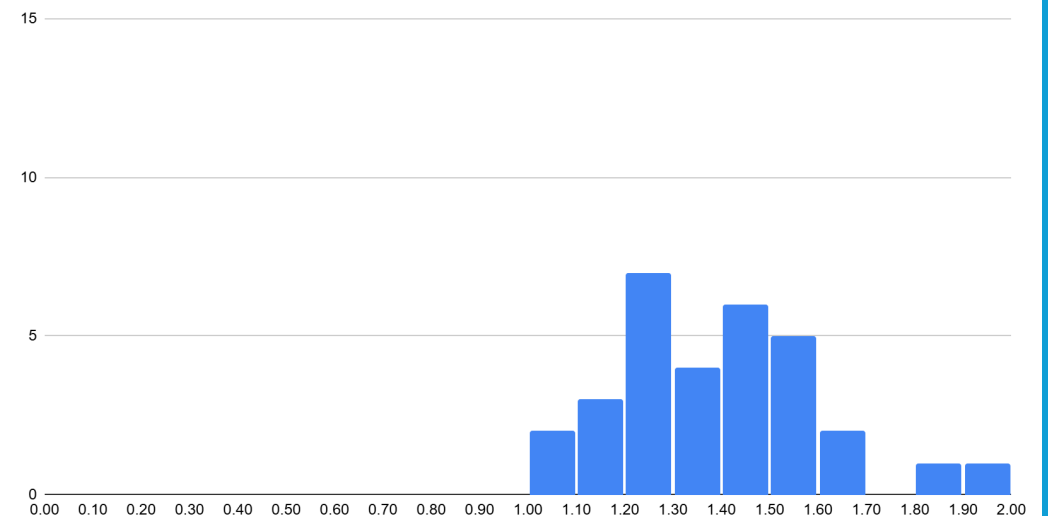
脊髄反射は通常の長潜時反射よりも早く惹起する短潜時反射。

RHI後のASR反射が遅延したという結果とは対照的である。

「驚愕反射」のヒストグラム



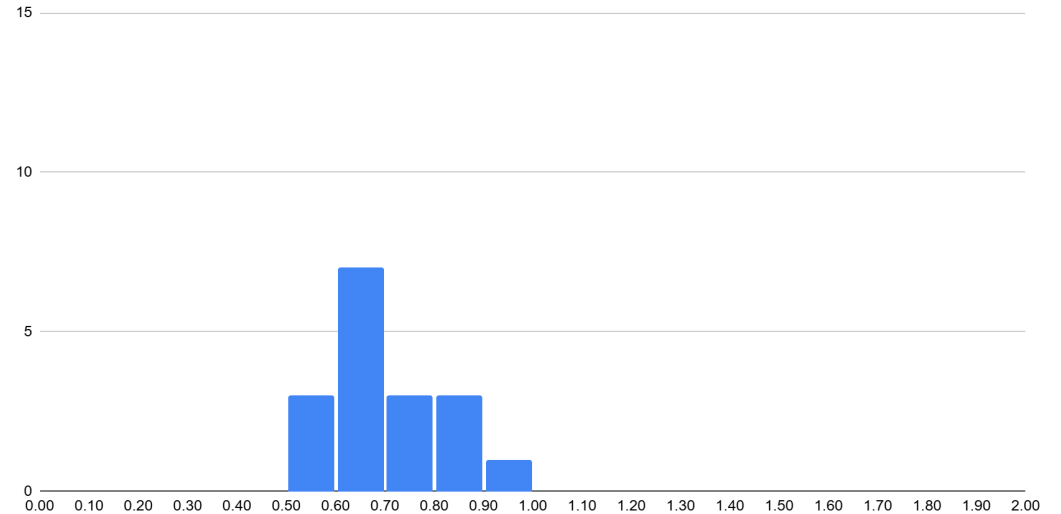
「RHI後」のヒストグラム



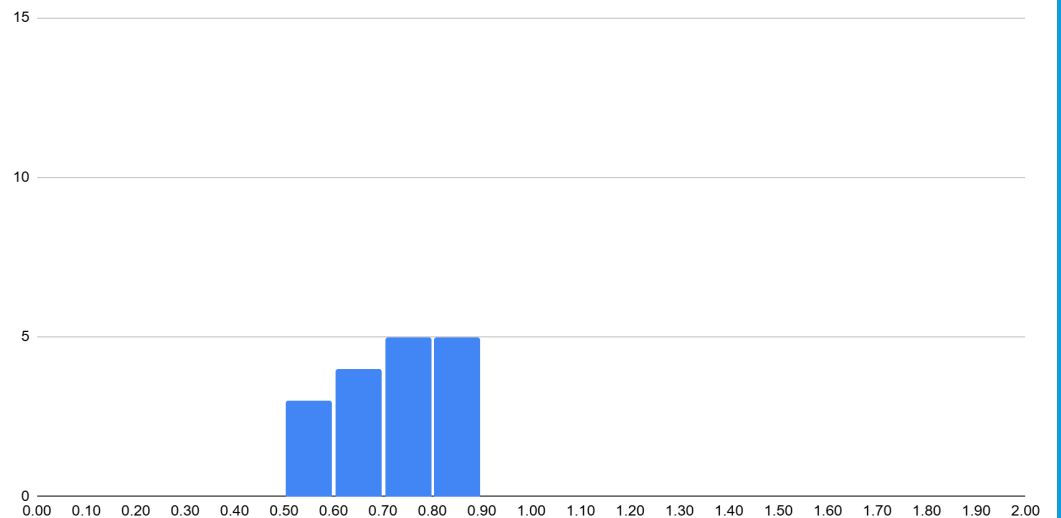
考察

しかし、実験2では同じくRHI後にASR反射を行っているが、反応速度は通常のASR反射と同程度であり、RHIの誘起操作そのものが遅延させるわけではないことを示している。

「実験2驚愕反射」のヒストグラム

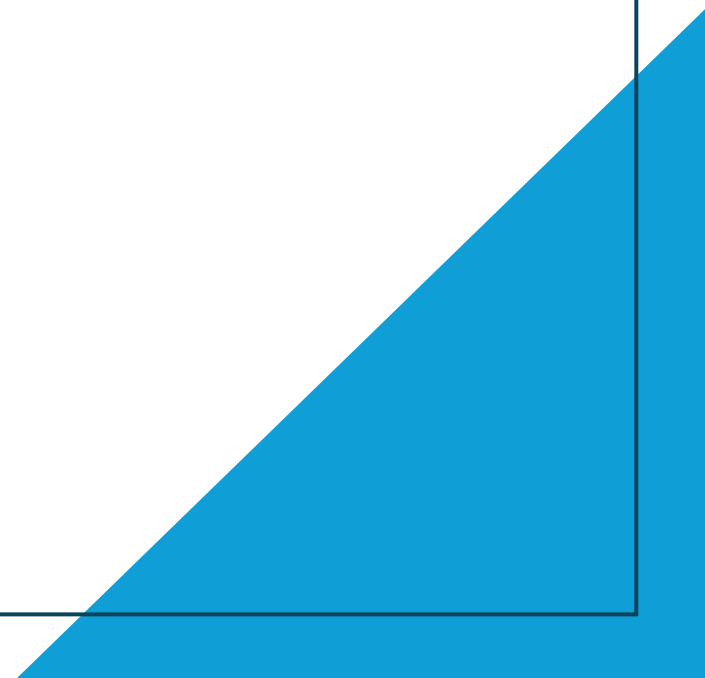


「実験2RHI後」のヒストグラム



考察

3つの概念モデルを用いた検討を行った。



考察

1, RHI後の反応速度=ASR反射速度

これは実験1から直ちに却下される。

実験1でRHI後の反応速度とASR反射速度は有意に差があると分かっている。

考察

2, RHI後の反応速度=ASR反射速度+通常の反応速度

このモデルはRHI後の反応速度はASR反射と通常
の反応が逐次的に生じた結果であると仮定したモデル。
よって、ASR反射速度と通常の反応速度の単純な足し
算で表される。

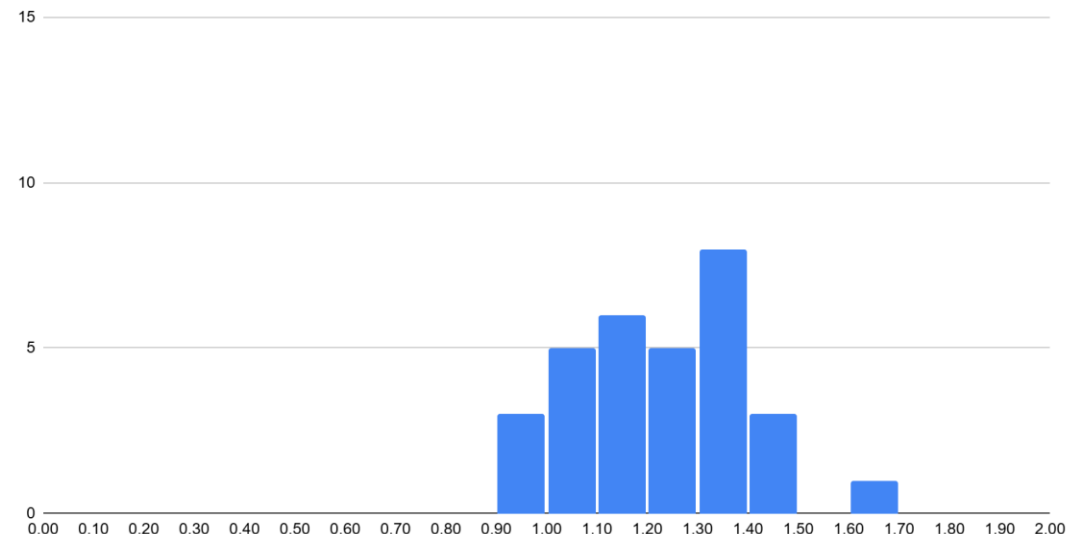
考察

2, RHI後の反応速度=ASR反射速度+通常の反応速度

しかし、平均値1.22、中央値1.20とRHI後の反応速度よりも一貫して長く、実測値と整合しなかった。

よって、このモデルも異なる。

「通常+驚愕反射/RHI」のヒストグラム



考察

3, RHI後の反応速度=ASR反射速度/2 +通常の反応速度

2のモデルをより実測値に近づけるために、ASR反射に含まれる成分の一部のみがRHI後の反応速度に寄与すると仮定し、ASR反射を制限し部分的な成分として扱ったモデル。

ASR反射速度を1/2に制限したものと通常の反応速度の足し算で表される。

考察

3, RHI後の反応速度=ASR反射速度/2 + 通常の反応速度

RHI後の反応を行う際にASR反射の出力行う必要がないのではないか？

短潜時反射は脳幹を通さないため、判断の時間を要さない。

よって、入出力の時間しか無い、入力、出力の時間はほぼ同じ速度であると仮定する。

よって、寄与するASR反射成分は半分と考えられる。

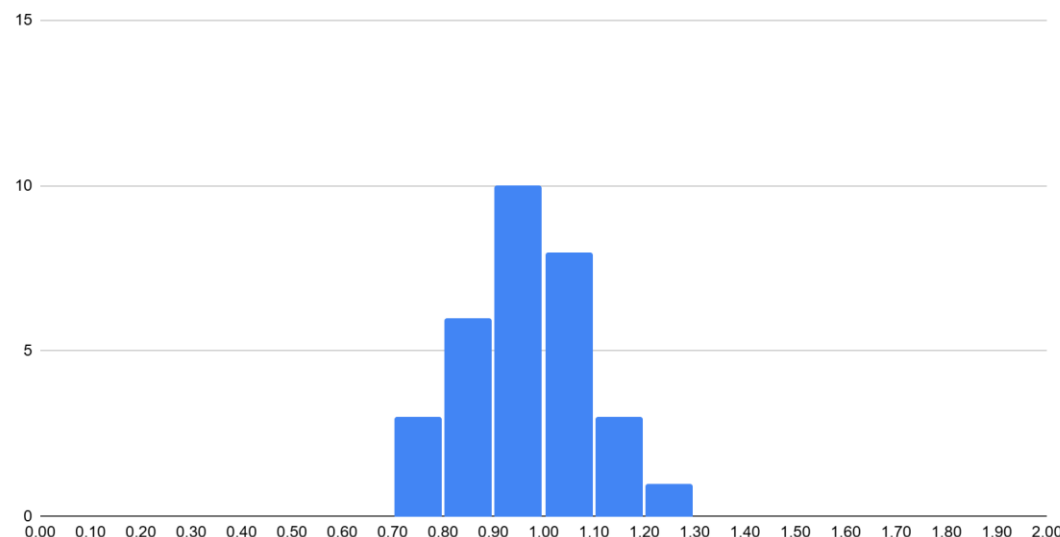
考察

3, RHI後の反応速度 = ASR反射速度/2 + 通常の反応速度

このモデルは、平均値0.97、中央値0.96とRHI後の反応速度と最も整合が取れた。

つまり、ASRの短潜時反射経路のみでは完結せずに、通常反射と同様の長潜時反射を用いた高度な処理が行われていることを示唆している。

「(通常+驚愕反射/2)/RHI後」のヒストグラム



考察

実験1と実験2の結果の差異はRHI後に要求される運動方向、それに伴う左手の身体所有感であろう。

実験1では身体所有感が左手は転移している。よって、身体認識位置もそちらへ転移しており、左手の空間的な位置の再統合が必要となる。

よって、高度な処理が必要となった。

一方、実験2では空間的な位置の再統合を必要としないため、通常のASR反射の処理で完結したと解釈される。

考察

RHIによって身体所有感を転移された身体部位への位置参照を必要とする際に、短潜時反射よりも高度な中枢処理が関与し、短潜時反射が弱まると考えられる。

一方、RHIを行われていたとしても、そのような参照を必要としない運動ではASR反射は通常通りに惹起する。

今後の展望

RHI後に一般的な音量で反射動作を行った場合は通常の反応速度と高い整合を示すはず。そのため、その実験を行う。

本研究で用いた反射指標を用いて、VR環境でRHIを行い、VR環境での身体所有感の挙動を確認する。

仮想身体錯覚が誘起している場合としていない場合でもその挙動を比べ、仮想身体錯覚の特性を確認する。

まとめ

RHI後にASR反射を行うと遅延する場合がある。

この遅延は身体所有感を伴う身体部位の位置参照により、高度な中枢処理を必要としているため。