



軌跡に重み付けされた手の一方向性運動学習が リーチング動作に及ぼす影響

Influence of trajectory-weighted unidirectional hand motor learning on reaching movements.

尾上凌太¹⁾, 湯村颯悟¹⁾, 蒲池みゆき²⁾

Ryota ONOE, Sogo YUMURA, and Miyuki G. KAMACHI

1) 工学院大学大学院 工学系研究科 (〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1, em22004@ns.kogakuin.ac.jp)

2) 工学院大学情報学部 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2, miyuki@cc.kogakuin.ac.jp)

概要: 人は視覚や動作で距離を知覚する。VEにおいて、長さを変化したバーチャルハンドで運動学習すると距離知覚は変容する。この知覚変容は運動に影響を及ぼすことが分かっている。しかし、一方位の運動学習での視覚-運動の重み付け動作がその後の運動において他の方位や領域に適用可能かについては明らかではない。本研究は、軌跡に重み付けされた手で一方位の運動学習した後、リーチング動作を空間領域ごとに調査した。その結果、一方位の運動学習がその後の運動の他の方位へ適用することは一部確認され、学習方位がその後の動作に影響を及ぼす可能性が示唆された。

キーワード: 運動学習, 視覚-運動協応, リーチング

1. はじめに

人は手の動きを計画するとき、手の位置を正確に把握する必要がある。手の位置は脳内の感覚-運動マップに依存しており、目からの視覚情報と腕や肩の筋肉や関節からの自己受容感覚の多感覚情報から生成される。このとき、視覚情報が他の感覚情報よりも優位に行動に作用するとされている。

バーチャル環境 (以下, Virtual Environment: VE) では、この視覚優位性を利用し、バーチャルハンドをユーザに気づかれぬ程度に、実際の手よりもずらして表示することができる。このバーチャルハンドの表現において、リアルな手を再現した場合、バーチャルハンドが実際の手よりもずれていることに気づきにくいことが分かっている[1]。リアルな手に近いバーチャルハンドでの運動は身体所有感を高め、その結果、自身の現実の手における感覚-運動マップはバーチャルハンドの見えによりマッピングされる可能性がある。また、バーチャルハンドと実際の手とのずれが一定の VE では、運動方向とずれの方向が一致しているか否か関係なく、自身の手の位置がバーチャルハンドの位置に近づいたと感ずることが示されている[2]。しかし、運動方位がその後の動作にどのような影響を及ぼすかは検討されていない。

また、視覚優位性を利用した錯覚現象として距離知覚や物の重さ知覚を変化させることができる。距離知覚につ

いては、バーチャルアームの長さを変化した状態で運動を学習した場合、奥行き方向の距離知覚が変容することが報告されている[3]。一方で、バーチャルアームの長さを変化させた状態で運動を学習しなかった場合は、奥行き方向の距離知覚は変化しなかった。物の重さ知覚については、バーチャルな物体を持ち上げる際に、その物体が実際の参加者の手に遅れて追従する手法と実際の持ち上がった距離よりもバーチャルでは小さく持ち上がる手法で、重さ知覚が変容することが報告された[4]。このようにバーチャルハンドの位置を実際の手とずらすバーチャル環境において、視覚情報と運動情報による協応が感覚-運動マップのリマッピングと知覚の変容に影響を及ぼすことが分かっている。

現実の環境下で運動学習を行い手の位置をリマッピングしたとき、学習後の運動はリマッピングされた感覚-運動マップを元に計画されることが示唆された[5]。ただし、スクリーンやタッチパネル、手の位置を測定するためにハンドルを使用した環境であったため、VEにおいても同様の結果が示されるかは明らかではない。

そこで本研究では、運動学習がその後の運動にどのような影響を及ぼすのかを解明することを目的とした。具体的にはバーチャルハンドと実際の手とのずれ度合いの違いと軌跡に重み付けされた手で水平方向のみの運動学習した後、リーチング動作を水平、奥行き、水平と奥行きの方位を合

成した斜めの方位の3つ空間領域ごとに調査した。一方位の運動学習が学習後の別方位の動作にも適用可能であれば、水平リーチングと奥行きリーチングの動作には同様の動作の変化が生じると仮定した。

2. 実験

2.1 方法

2.1.1 実験参加者

実験参加者は5名（男性4名，女性1名，全員右利き，平均年齢23歳）であった。実験参加者は裸眼または矯正によって、健常な視力を有した。なお、本実験にあたって実験参加者には同意書及び指示によって実験内容の説明を行ない、「工学院大学ヒトを対象とする研究に関する倫理審査委員会」の審査により承認を得た。

2.1.2 実験環境

実験ではMeta Quest2及びハンドトラッキング機能とキーボード、頭と両腕を除く上半身の動作を抑制する椅子を用いた。図1左に身体動作を抑制する椅子の様子を示す。本研究では、腕の動きのみで運動学習を行う必要があるためベルトで両肩と腰の3点を椅子に固定し、腕以外の身体の動きを抑制した。図1右のように右腕の奥行き方向における最大到達座標（右腕を伸ばし切った位置）と最小到達座標（腕を引いて最も手前の位置）から可動域を測定し、最大到達座標と最小到達座標の平均座標を算出し、課題における運動開始の原点とした（図2左の赤ボタンかつ図3の緑点）。仮想環境はUnity（2021.3.12fl）とOculus Integration SDK（v54.1）で作成した。

2.1.3 実験条件

バーチャルハンドと実際の手のずれ度合いの違いで運動学習の効果を比較するために、運動軌跡に対する5つの重み付け条件（80%、90%、100%、110%、120%）を設定した。これにより運動学習時ではバーチャルハンドが実際の手よりも大きくあるいは小さく動くように重み付けがなされた。本実験の主眼は、水平方向の運動学習が同方位または異方位のリーチング動作にどのような影響を及ぼすのか明らかにすることであるため、リーチング課題の条件として水平、奥行き、斜め（水平に対して45度）のリーチング方向を設定した。リーチング条件は図2のように、水平リーチ、斜めリーチ、奥行きリーチとし、運動開始の原点（可動域の中央）から5cm、10cm、15cmの距離に9つのリーチ目標を設定した。

2.1.4 運動軌跡に対する重み付け手法

本実験では、右手の運動の水平方向に対して、重み付けを行い自身の手とバーチャルハンドの移動量に差が生じた状態で運動が可能なシステムを構築した。実験参加者には「実際の手とバーチャルハンドの動きに違いが生じる」ことは伝えなかった。

[1]に倣い、右手に対応したバーチャルハンドの水平成分の位置を式(1)で計算した。重み付けの値を ω 、実際の手の手腕の水平成分の位置を x_{REAL} 、バーチャルハンドの水平成分の



図1: ベルトで上半身の動作を抑制する椅子(左図), 右手の奥行き方向の可動域から中央値を算出(右図)



図2: 課題開始前の赤ボタン(左)
課題開始時の緑ボタン(中央)
バーチャル環境内の線をなぞる様子(右)

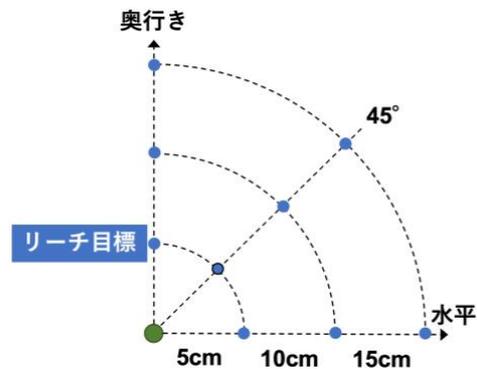


図3: リーチング目標の青色ボールの出現位置

位置を x_{VE} とした。また、可動域の中央値すなわち運動開始の原点を x_0 とした。これにより、重み付けの値が大きい（110%、120%）場合は、実際の手はバーチャルハンドよりも小さく動き、一方で小さい（80%、90%）場合は、実際の手はバーチャルハンドよりも大きく動いた。

$$x_{VE} = \omega x_{REAL} - x_0 \quad (1)$$

2.1.5 実験手順

実験参加者は運動課題とリーチング課題を行なった。運動課題は運動の学習フェーズに相当し、実際の手とバーチャルハンドの動きに違いが生じた状態で、実験参加者は線を右手人差し指でなぞった。課題開始前に図2左のように右手人差し指を赤色のボールに近づき、図2中央のようにボールが緑色になるよう人差し指の先端を接触させた。ボールを緑色に保った状態で2秒間静止し、緑ボタンが消失するとともにビープ音の合図でガイド領域内（横長の棒）を人差し指でなぞり続ける学習を行った。ガイド領域の端からもう片方の端までなぞったときを1回とカウントし、計30回なぞり動作を繰り返した。このとき、水平方向の運動学習において、線上の左右両端と上下および手前奥か

ら1 cm 離れると負のフィードバックとしてカウントを-1 回とした。カウントは図 2 右のようにパネルで表示した。

運動課題終了直後リーチング課題を行なった。運動課題と同様に赤色のボールに右手人差し指を近づけて、ボタンが緑色の状態で 2 秒間静止した。その後、バーチャルハンドを含む全てのオブジェクトの見えが消失し、リーチ目標となる青色のボールが出現した。青色のボールが出現したタイミングで、そのボールに右手人差し指をリーチングした。リーチング動作について、実験者は実験参加者に「自身の感覚を頼りに青色のボールにリーチして、ボールと見えない手の人差し指の先を重ねる」ことを伝えた。実験参加者はボールと人差し指が重なったタイミングで左手にあるキーボードのスペースキーを押下した。

実験参加者は 2 つの課題の説明を受けた後、課題の理解のために練習試行を行なった。重み付け条件とリーチング条件の組み合わせ 45 通りで各組み合わせを 4 回ずつ行った。運動課題開始時からリーチング課題のスペースキーを押下するまでを 1 試行として計 180 試行をランダムな順序で 2 日間 (1 日につき 90 試行) に分けて行なった。2 日目は 1 日目から 1 週間後であった。なお、課題による疲労を軽減する目的として、休憩は 10 試行ごとに必ず行なった。

2.2 結果

2.2.1 重み付けによるリーチング動作の検証

重み付け条件によるリーチング動作の違いと水平方向の運動学習が奥行き方向のリーチングに適用可能かについて検証した。図 5 は水平リーチと奥行きリーチのとき、重み付け条件に対して、リーチング条件における目標リーチ距離に与える理論値とリーチの差を表す。運動学習時の重みが純粋にリーチングに影響した場合の座標を理論値とした (例, 目標リーチ位置 5 cm のとき, 重み付け 80% であれば, 理論値は $5 / 0.8 = 6.25\text{cm}$)。理論値とリーチした位置との差が 0 に近い場合, 水平方向の運動学習が学習後の同方位もしくは異方位の動作に適用可能であることを示す。水平リーチでは, 80% と 90% が約 2 cm で他条件に比べて差が小さいことが確認された。重み付けが大きくなるにつれて, 目標リーチ距離が遠い場合は差が大きくなり, 近い場合は差が小さくなる傾向が見られた。一方, 奥行きリーチでは, 重み付けが大きくなるにつれて, 理論値との差は距離に依存せず収束することが分かった。重み付けの値が 80% と小さくなるにつれて, 目標リーチ距離が遠い場合は差が小さくなり, 大きい場合は差が大きくなる傾向が見られた。

2.2.2 方位によるリーチング動作の検証

図 6 は重み付け条件に対する, 水平リーチの奥行き方位の位置は実際よりも手前もしくは奥にずれてリーチしたこと, 奥行きリーチの水平方位の位置は実際よりも右もしくは左にずれてリーチしたことを表すグラフである。2 要因分散分析を行なった結果, 水平リーチと奥行きリーチに

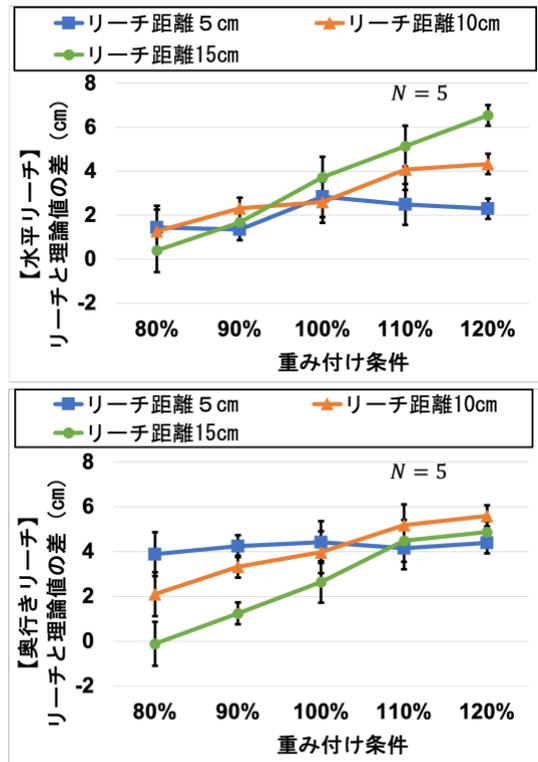


図 5: 重み付けによる目標とリーチ位置の差の比較 (エラーバーは 95%信頼区間を表す)

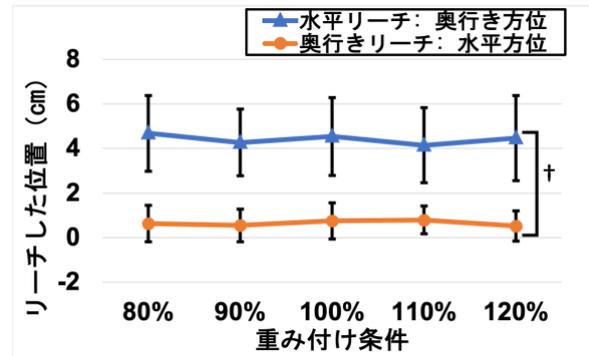


図 6: 水平リーチの奥行き方位の位置と奥行きリーチの位置の比較 (エラーバーは 95%信頼区間を表す)

主効果 ($F(1, 4) = 6.529, p = .063$) が確認されたが, 重み付け条件による主効果, 重み付け条件とリーチ条件 (水平リーチと奥行きリーチ) の交互作用は確認されなかった。このことから, 水平リーチは目標リーチと奥行き方位でずれが大きいことが分かった。

2.2.3 斜めリーチングの方位におけるリーチ位置の検証

斜め方位のリーチングにおける, リーチした位置をプロットしたグラフが図 7 である。横軸が水平方位のリーチした位置, 縦軸が奥行き方位のリーチした位置である。オレンジ色のマーカと実線でスタート位置からの 5 cm, 10 cm, 15 cm の 3 つの距離を表している。青色のマーカは 5 つの重み付け条件と 3 つのリーチング条件の全ての組み合わせ条件でリーチした位置である。このグラフから重み付け

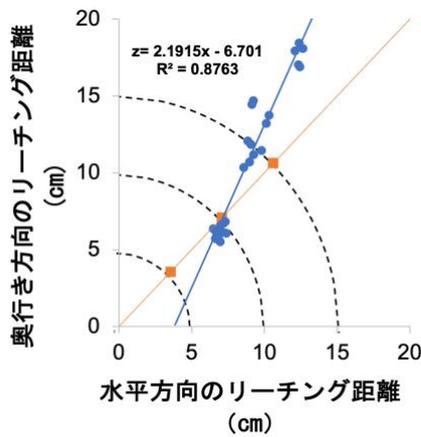


図 7: 斜めリーチにおけるリーチした位置

条件が斜めリーチに影響を及ぼすのか分からないが、回帰直線の傾きは、約 2.2 であることから、奥行き方位が過大評価される傾向が確認された。また、目標リーチの位置が参加者から遠くなるにつれて、リーチした位置と目標リーチ位置との差が大きくなっている。

2.3 考察

重み付け条件によるリーチ距離と理論値の差において、水平リーチでは、重み付けの値が 80%、90% のとき、リーチ距離と理論値の差が小さい傾向があった。これは実際の手がバーチャルハンドより大きく動くとき、学習が適用されやすい。また、重み付けの値が大きくなるにつれてリーチ距離が遠いほど差が大きくなった。これは、実際の手がバーチャルハンドよりも小さく動くとき、学習が適用されにくい。一方で奥行きリーチは重み付けの値が 80% でリーチ距離が 15cm のとき、他条件に比べて最も差が小さいことが分かった。これは学習適用したことを表す。水平リーチで見られた重み付けが大きいときのリーチ距離による差の違いについては、奥行きリーチでは重み付けが小さいときに似た傾向が確認された。これは参加者ごとの可動域データ等を解析する必要がある。以上より、一方位の運動学習はリーチング動作における他方位にも限定的な適用する可能性がある。

水平リーチと奥行きリーチについて、リーチ方向と直交する方位と目標リーチ位置との差においては、有意な差があった。水平リーチでは、奥行き方位が大きくずれることが分かった。これは、重み付け条件または、奥行きの手がかりが影響を及ぼした結果である可能性が考えられる。もし、重み付け条件による影響であるならば、運動課題の運動方向を本実験の水平方向ではなく、奥行き方向で行ったとき、奥行きリーチの水平方位の方が大きな差となると考える。また、奥行きの手がかりによる影響であるならば、本実験の VE に線遠近法やきめの勾配などの手がかり付加することで確認できる可能性がある。実験者は実験参加者にリーチ目標は水平と奥行き在同一平面上であることを伝えていなかった。運動学習で奥行き方向の運動を行うこ

と、同一平面上でリーチングをすること、奥行きの手がかりを付与した VE で実験を行うなど検証を行う必要がある。

斜めリーチについて、奥行き方位は水平方位と比べて過大評価されることが分かった。これは、奥行きの手がかりが限定されていること、バーチャルハンドが見えている状態で奥行き方向に運動学習していないことが原因であると考えられる。バーチャルアームを変化させて距離知覚を変容させる研究では、腕の長さは距離を把握する定規の役割があることが分かったが[3]、過大評価された原因は分からないため、引き続き検証を進める必要がある。

3. おわりに

本研究では、一方位の運動学習での視覚—運動の重み付け動作がその後の運動において他の方位や領域に適用可能か調査することを目的として、リーチング動作を空間領域ごとに調査した。実験では、バーチャルハンドが見えない状態で行ったリーチング動作を計測し、5つの重み付け条件間の比較と9つのリーチング距離間の比較を行なった。一方位の運動学習はリーチング動作における他方位にも限定的な適用可能性があり、水平リーチにおける奥行き方位のずれは奥行きリーチにおける水平方位のずれよりも大きい傾向が確認された。今後は、運動軌跡に重み付けしたバーチャルハンドで運動学習させ、かつ参加者数を増やし今回とは異なる奥行き方向で運動学習することで確認された傾向を検証する。一方位の運動学習での視覚—運動の重み付け動作が学習後の運動において他の方位や領域に適用可能かについて明らかにしたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費（課題番号 JP20H00608）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Nami Ogawa, Takuji Narumi, Michitaka Hirose, "Effect of Avatar Appearance on Detection Thresholds for Remapped Hand Movements," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol.27, no.7, pp.3182-3197, 2021.
- [2] H. J. Block, and Yang Liu, "Visuo-proprioceptive recalibration and the sensorimotor map," *J Neurophysiol*, vol. 129, issue. 5, pp. 1249-1258, May 2023.
- [3] S. A. Linkeauger, H. H. Bulthoff, and B. J. Mohler, "Virtual arm's reach influences perceived distances but only after experience reaching," *Neuropsychologia*, vol 70, pp. 393-401, Apr. 2015.
- [4] 平尾 悠太郎, 三家 礼子, 河合 隆史, "VR 空間におけるクロスモーダルを用いた重さ感覚提示手法の提案と評価," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol 23, no. 4, pp. 263-270, 2018.
- [5] 内田 裕基, 繁樹 博昭, "バーチャルな身体の運動方向, 偏位方向およびサイズが自己受容感覚ドリフトに及ぼす影響," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol. 26, no. 1, pp. 61-67, 2019.