



重み付けされた身体動作が空間知覚に及ぼす影響

Influence of weighted body movements on spatial perception

尾上凌太¹⁾, 蒲池みゆき²⁾

Ryota ONOE and Miyuki G. KAMACHI

1) 工学院大学大学院 工学研究科 (〒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: 人は感覚器官の情報により物体や自らの身体を含む空間を知覚している。例えば垂直方向に実際と異なる距離で手が持ち上がる視覚情報をフィードバックすると、重さの錯覚が生じる。本研究では、視覚的に重みづけした水平方向の手の運動を学習すると、その消失後に空間座標が変位すると仮定する。空間の変位方向は学習した方位に依存するのか、可動範囲全域におよぶのかについて、重みづけのパラメータによる理論値と変位の比率をもとに検証した。その結果、空間の変位の方向は運動学習時の方向に依存している可能性があることが分かった。

キーワード: 自己受容感覚ドリフト, 空間知覚, 知覚学習

1. はじめに

VR 空間上では自身の身体に対して腕の長さや手の大きさ、動作制御などが異なるバーチャルな身体を使用することができる。周辺環境の空間が狭い場合、バーチャルな身体の動きが実際の動きと比べて大きく動くことで、動きの制限をなくすことができるだろう。このとき、自身の身体的位置はバーチャルな身体的位置と異なっている。人は様々な感覚器官により自身の身体を含む空間を知覚している。そのため、身体部位の実際の動きとバーチャルな身体部位の動きにずれが生じた場合、自身の身体を含む空間にどのような影響がおよぶのか検討する必要がある。先行研究では、空間をずらした状態で視覚と触覚刺激を呈示すると、視触覚統合により身体空間座標系が変位すると分かっている。例えば、布で視覚的に覆われた自身の手とラバーハンドのみが見える状態で同時に触覚刺激を与えると、ラバーハンドが自身の手であるかのように錯覚する[1]。この錯覚はラバーハンド錯覚 (以下, RHI) と呼ばれている。このとき、主観的な手の位置がラバーハンドの位置に近づいて知覚されることが確認されている[2]。本実験では、主観的な手の位置が視覚的な手の位置の方へ移動することを変位と呼ぶこととする。

RHI の生起は視触覚刺激だけでなく視覚刺激のみでも生じることが報告されている。例えば、ラバーハンドの動きが自身の手と同じ動きかつ時間的に同期した場合、RHI が生じる[3]。自身の身体とバーチャルな身体の動きの同期する VR 空間においても RHI が生じ、変位することが報告

されている[4][5]。VR 空間において、実際の手の位置とバーチャルな手の位置とのずれが一定の状態、左右もしくは前後運動を行うと、運動方向に関わらず変位することが分かっている[4]。これは、変位の影響には方位の選択性がなく、自身の身体を含む空間全体におよんだのではないかと考えられる。さらに、水平方向において、実際の右手の位置がバーチャルな手の位置よりも右側となるずれは変位が大きくなることも分かっている[5]。このことから、変位の発生する位置と自身の身体的位置との関係性には、なんらかの選択性があることが考えられる。このように、変位を生じさせるための運動方向と実際の手とバーチャルな手の位置関係による、変位の特性については独立して検討がなされてきた。よって、実際の手とバーチャルな手がさまざまな位置関係となるように視覚的に重み付けられた手の運動が変位に与える影響について検討する。

2. 実験

本研究では、運動学習時のずれの違いと運動方向が自身の身体を含む空間の変位にどのような影響を与えるのかを調査することを目的とする。具体的には、実験参加者が水平方向に手の運動を行い、運動停止後に出現するターゲットに手を置く課題を課す。水平方向の手の運動に対し、バーチャルな手の位置は実際の手的位置に呈示される。ターゲットとなる目標と課題で置いた手の位置のずれを測定し、変位とする。本実験では、実際の手動きに対するバーチャルな手のずれの割合をシフト率と呼ぶこととす

る。このシフト率の違いが空間の変位に影響を及ぼすのか確認するためにリーチングを行った。

2.1 方法

2.1.1 実験参加者

実験参加者は4名（全員男性で右利き，平均年齢 22.75歳）の実験の目的を知らない大学生，大学院生であった。全員が裸眼または矯正によって，健全な視力を有した。なお，本実験にあたって実験協力者にはあらかじめ同意書および教示文にて実験内容の説明を行っており，また「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」による審査により承認を得た。

2.1.2 実験装置

VR 空間上の手の動きを実際の手の動きと同期させるためにハンドトラッキング機能を備えたヘッドマウントディスプレイ（Facebook Technologies, LLC 社 Oculus Quest, 以後，HMD）を用い，身体的位置データを取得した。アバタの上半身の動作は頭部と手の動きの情報により逆運動学を用いて制御された。そして，本実験で得られたデータから，学習した運動方向が動作範囲全域（机上の水平方向と奥行き方向）におよぶのかを検証した。なお，机上（中央）に原点を設定し，VR 空間の絶対座標系の中心と一致させた。水平方向は X 軸，奥行き方向は Z 軸と設定した。

2.1.3 シフト方法

本実験では，右手が水平方向にシフトが生じるシステムを構築した。シフト条件は7つのシフト率（0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3）であり，いずれの条件下で実際の手とバーチャルな手の位置のずれが連続的にシフトするものであった。自身の手とバーチャルな手がずれることは実験参加者には伝えずに実験を行った。

式(1)は VR 空間の絶対座標系で計算式を示している。実際の手とバーチャルな手の動きのずれの度合い，すなわちシフト率を ω ，実際の手的位置ベクトルの水平成分を x_{real} ，バーチャルな手的位置ベクトルの水平成分を x_{vr} とする。

$$x_{vr} = \omega x_{real} \quad (0.7 \leq \omega \leq 1.3) \quad (1)$$

2.1.4 実験手続き

実験の様子（左：現実空間，右：VR 空間）を図1に示す。実験参加者は机の中心と使用した椅子と机の位置と高さは実験者によって調整された。

実験参加者は運動課題とリーチング課題を行った。運動課題とは運動の学習段階に相当し，実際の手とバーチャルな手の動きにずれが生じた状態で，実験参加者は運動統制用の球体ポインタ（図2）を追従した。リーチング課題とは，学習した運動のテスト段階に相当し，運動課題終了後すぐに呈示されるマーカにできるだけ素早く中指を置くことであった。

運動課題の視覚刺激を図2に示す。手の動きを統制するための半径 1.5cm の球体のポインタを用意した。この球体ポインタの中心は机から 3.5cm 浮いた位置に設定された。実験参加者は中指をそのポインタに合わせながら，追従するように運動を行った。さらに，このポインタの色はポイ



図1：現実空間（左）とVR空間（右）の運動課題の実験風景

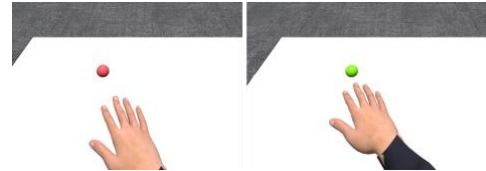


図2：赤色の球体ポインタ（左）と緑色の球体ポインタ（右）の運動課題の様子



図3：リーチング課題のターゲットとなる青マーカ

ンタと中指の距離によって変化し，球体の中心から半径 4.5cm 以内に中指がある場合は緑色，その他の場合は赤色となった。この球体のポインタは原点を中心とし，水平方向-10cm から+10cm の間で，毎秒 15cm で往復運動を繰り返した。ポインタの色が緑色の状態で，右から左へまたは左から右へ運動を行うと+1とカウント，ポインタの色が赤色になった時点で-1とカウントされる。そのため，この課題は+20までカウントされた時点で終了とし，バーチャルな身体とポインタが消失した後は，実験参加者は手その位置のまま机の上に手を置くよう指示された。実験参加者の手が机に置かれたことを確認したのち，実験者のタイミングでリーチング課題のマーカが呈示された。

リーチング課題の視覚刺激を図3に示す。この課題のターゲットは机上の青色のマーカとし，実験参加者は青色のマーカにできるだけ早く中指を置くよう教示された。ターゲットとなるマーカの位置は運動課題終了後の手の位置を初期位置とし，初期位置から水平方向と奥行き方向のそれぞれ-15cm から+15cm の範囲 1cm 刻みでランダムな位置に呈示された。これは，水平方向のシフト条件下の運動が水平方向のみではなく，奥行き方向においても空間の変位が生じているのか検証するためである。また，ランダムな組み合わせにすることで試行前後の影響を考慮した。

実験参加者は2つの課題について説明を受けた後，課題の理解のため練習試行を行った。運動課題時の7つのシフト条件につき各 15 回繰り返し，マーカはランダム位置に呈示された。リーチング課題の終了時までを1試行として，全 105 試行を行った。なお，休憩は1試行終了時に実験参加者の意思で行われた。

2.2 結果

図4の左にシフト率90%における、リーチング課題時の水平方向の変位の結果を示す。グラフの値は絶対座標系で示されており、横軸は水平方向のターゲットのマーカの位置（奥行き方向の変位の場合、奥行き方向のターゲットのマーカの位置）である。水平方向であるX軸上で正の値は原点に対して右側に、負の値は左側にマーカがあることを示す。また、奥行き方向であるZ軸上で正の値は原点に対して実験参加者からみて奥側に、負の値は手前側にマーカがあることを示す。縦軸は実験参加者の中指とそのマーカとの差分、すなわち変位である。また、実線は変位の回帰直線、点線は変位の理論値を表す。理論値とは運動学習時のバーチャルな手の位置に完全に変位したときの直線近似した場合の傾きであり、シフト率90%では理論値0.1となる。図4の右図での青の棒グラフはその回帰直線の傾きを示している。傾きが正であれば、実際の手の動きはバーチャルな手の動きと比べて大きく動いていることを表す。一方で、傾きが負であれば、小さく動いていることを表す。また、右図にシフト率90%のときの理論値を加えている。実際の傾きが理論値より下回っているが、これは実際の手の動きは完全に変位した場合よりは小さくかつバーチャルな手の動きより大きく動いているためである。以上のように各シフト率について回帰分析を行った。

図5は水平方向について、理論値が0となるシフト率100%を除く、各シフト率の理論値に対する回帰直線の傾きの比率を示す。その結果、シフト率90%の比率は約0.38であったが、その他のシフト率の比率は約0.10以下であった。これは、水平方向において、運動学習時のシフト率90%のときは比較的に主観的な手の位置がバーチャルな手の位置へ近づくように空間が変位したことを示す。

一方、図6は奥行き方向について、図5と同様の比率を示す。その結果、全てのシフト率の比率は0に近い値であった。これは、変位は運動学習時の方位に依存し、水平で学習された結果、奥行き方向には発生しないことを示す。

次に、リーチング開始時の動作の方向、つまり自分の身体の内側方向か外側方向かに着目し、回帰直線の傾きの違いを確認した。

図7と図8は、水平方向ではリーチング開始時の動作がYZ平面から離れる向きを外側、近づく向きを内側とし、奥行き方向では同様な動作が身体から離れる向きを外側、近づく向きを内側とし、変位の傾きの比率を示す。水平方向において、手とマーカの位置関係によっては、離れる（外側）あるいは近づく（内側）運動の最中に、身体のZ軸と原点を通る平面をまたぐようなリーチングもあり得るが、あくまでも開始時の方向性によって分類したものである。その結果、図7の水平方向のリーチング動作の外側について、シフト率90%の比率は約0.72、シフト率110%の比率は約-0.40であり、その他のシフト率は0に近い値であった。これは、運動学習時のシフト率90%のときは比較的に主観的な手の位置がバーチャルな手の位置へ近づくよう

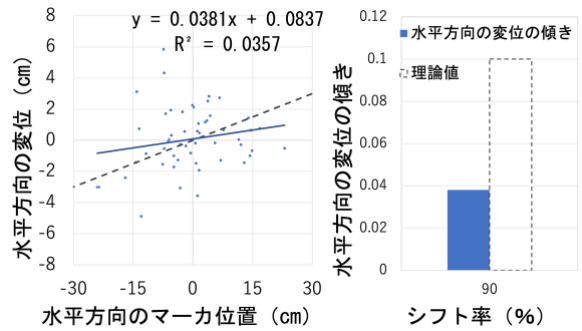


図4：シフト率90%の水平成分のマーカ位置に対する水平方向の変位の散布図（左）とその変位の回帰直線の傾きと理論値の傾き（右）

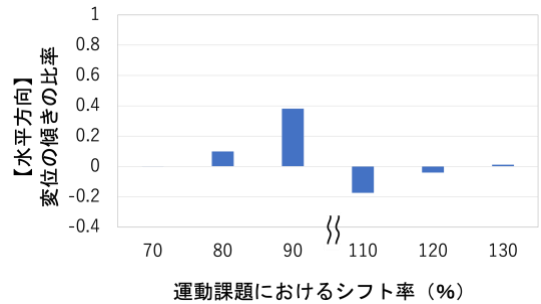


図5：水平方向の変位の傾きの理論値比率

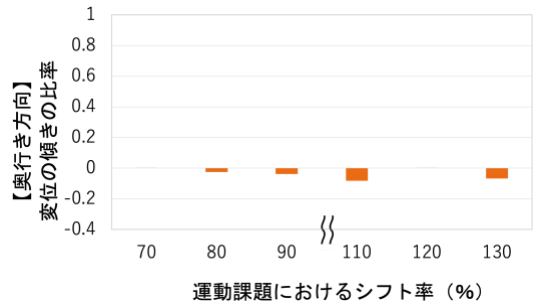


図6：奥行き方向の変位の傾きの理論値比率

に空間が変位したことを示す。一方で、シフト率110%のときは比較的に主観的な手の位置がバーチャルな手の位置から離れるように空間が変位したことを示す。また、リーチング動作の内側について、シフト率80%と90%の比率は-1.00以下、シフト率110%、120%、130%の比率は1.00以上であった。これは、運動学習時のシフト率80%と90%のときは主観的な手の位置がバーチャルな手の位置から離れるように空間が変位したことを示す。一方で、シフト率110%、120%、130%のときは主観的な手の位置がバーチャルな手の位置へ近づくような空間が変位したことを示す。

図8の奥行きのリーチング動作の外側について、シフト率110%と130%の比率は約0.13と約0.16であったが、その他のシフト率の比率は-0.10以下であった。これは、シフト率110%、130%のとき比較的にバーチャルな手の位置に近づくように空間が変位したことを示す。一方で、リーチング動作の内側について、シフト率110%の比率は、約0.66であったが、その他のシフト率の比率は約0.15以下であった。これは、シフト率110%のとき比較的にバーチャルな手の位置に近づくように空間が変位したことを示す。

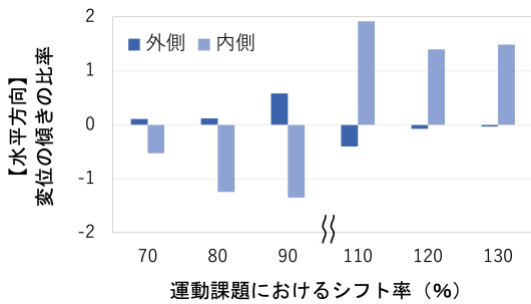


図7：水平方向の変位の傾きの理論値比率（リーチング動作の向き）

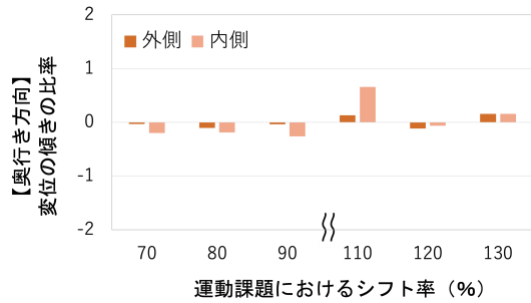


図8：奥行き方向の変位の傾きの理論値比率（リーチング動作の向き）

2.3 考察

水平方向と奥行き方向に分けて変位を分析した結果、水平方向においてはシフト率 90%のとき、主観的な手の位置がバーチャルな手の位置へ近づくように空間が大きく変位した。しかし、奥行き方向においては空間が変位しなかった。このことから、水平方向においては運動学習時にバーチャルな手が身体の正中線へ近づくようなずれのとき空間の変位し、運動方向の方位に依存した空間の変位が確認された。

リーチング開始時の動作の向きに分けて分析した。その結果、水平方向において、外側でシフト率 90%のとき主観的な手の位置がバーチャルな手の位置へ近づくように空間が変位した。一方で、内側でシフト率 110%、120%、130%のときは主観的な手の位置がバーチャルな手の位置へ近づくように空間が変位した。また、シフト率 80%と 90%のときは主観的な手の位置がバーチャルな手の位置から離れるように空間が変位した。このことから、水平方向に関しては向きによって、空間の変位が異なることが分かった。動作が外側で運動学習時にバーチャルな手が身体の正中線へ近づくようなずれのとき、限定的に運動方向の方位に依存した空間の変位が確認された。限定的であった理由は、リーチング課題の初期位置から離れた位置となり、動作は外側であるため、手の稼働範囲の限界という問題が考えられる。また、動作の向きが内側で運動学習時にバーチャルな手が身体の正中線から離れるようなずれのとき、運動学習時の方位に依存した空間の変位が確認された。一方運動学習時にバーチャルな手が身体の正中線へ近づく

ようなずれのとき、運動学習時の逆の方位に依存した空間の変位が確認された。よって、リーチング開始時の向きが内側のときは運動学習した方位に依存する場合や学習時の動きよりも小さな動きとなる場合が考えられる。身体の正中線が手がかりとなり、向きの違いによる空間の変位に影響をおよぼした可能性がある。

奥行き方向に関しては、動作の向きが外側ではシフト率 110%と 130%、内側ではシフト率 110%のとき、運動学習時の方位に依存した空間の変位が確認された。動作に関わらず限定的に空間が変位されていたことから、空間の変位は手の可動範囲におよぶこともあるが、運動学習時のずれの条件によっては変位しないことが考えられる。

3. おわりに

本研究では、視覚的に重みづけた手の運動を学習したとき空間座標が変位すると仮定し、変位方向は学習した方位に依存するのかが、可動範囲全域におよぶのかについて、重みづけのパラメータ（シフト率）による検証を行った。その結果、変位の方向は運動学習時の方向に依存している可能性があることが分かった。

今後は、自身の体を含む空間の変位を目的変数とした、モデル化を試みようと考えている。今回の実験をふまえて解析の方法、課題の改善や変位の特徴など特定を行う。

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] Botvinick, M. and Cohen, j., “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, Vol.391, No.6669, p.756, 1998.
- [2] Satoshi Shibuya, Satoshi Unenaka, Yukari Ohki, “Body ownership and agency: task-dependent effects of the virtual hand illusion on proprioceptive drift,” *Experimental Brain Research*, vol.235, no.1, pp.121-134, 2016.
- [3] Andreas Kalckert, H. Henrik Ehrsson, “The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership,” *Consciousness and Cognition*, vol.26, pp.117-132, 2014.
- [4] 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.24, no.1, pp.61-67, 2019.
- [5] 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.