



認知リハビリテーション領域に適用できる VR を用いた 主体感を付与した視行動誘導手法の提案

金子宗平¹⁾, 衛然¹⁾, 中村美緒¹⁾, 檜山敦¹⁾, 水野純平²⁾, 二瓶美里¹⁾

1) 東京大学 (〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 5 丁目 1-5 東京都文京区本郷 7-3-1, 3950353240@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 京都大学 (〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町, jumpei.mizuno@gmail.com)

概要：動機付けはリハビリテーションの長期的な効果を決定する重要な要因である。運動領域のリハビリでは VR を用いて主体感を持たせることで動機づけを行う方法が提案されているが、認知領域でのリハビリでは同様の手法は提案されていない。本研究では、認知領域のリハビリに対して、非明示的な視線行動手法であるリダイレクションと SDoF を実装した無誤学習 VR システムを提案した。その結果、SDoF はタスクの成績と動機付けを向上させた。

キーワード：行為主体感、無誤学習、視行動誘導

1. 緒言

リハビリテーション(本論文では理学療法, 作業療法を代表とする医学リハビリテーションを指し, 以後リハビリと略す)の長期的な回復効果は, 患者がどれだけリハビリに継続的に取り組んだかに大きく依存する。そのため, リハビリの実施では患者の継続意欲を高める工夫が要求される。一般的には, 療法士が患者にポジティブな声かけを行うなど, リハビリ内容の外側で継続意欲を高める介入がなされる。しかし近年, Virtual Reality(VR)の普及により, 全く異なるリハビリ継続意欲向上のアプローチが可能になりつつある。リハビリ継続意欲低下の原因として, 「思い通りにできないこと」「上達が感じられないこと」が存在する。これらを「主体感が低下している」と解釈し, 主体感を高める介入を行うことでリハビリ内容自体に意欲向上性を持たせるというアプローチである。

Aoyagi らは, 運動領域のリハビリを想定し, 被験者の上肢運動を伴う腕の動きを, ヘッドマウンテッドディスプレイ(HMD)を通して現実世界の運動よりも目標軌道に近い動きとして見せることで, 現実世界の運動が思い通りにできていない場合であっても擬似的な上達によって運動の主体感を付与できる方法を提案した[1]。

認知領域における, 継続意欲を考慮した代表的な手法は, 無誤学習であり, 誤り行動をプロンプト(介入)によって予防し, 正しい行動のみを経験させるものである。

しかし, 無誤学習は自力で正解を導いた実感を欠きやすいことが懸念され, 主体感の観点で短所を持つ。対して前述の虚偽のフィードバックは, 成績修正が可能な課題が限られること, そして誤り行動を訂正できない欠点を持

つ。これら認知領域の 2 手法の欠点は互いに補完できると考えられ, 組み合わせることで継続意欲の高い新たなリハビリの概念になることが考えられる。すなわち「無誤学習であるが, プロンプトによって指示された行為にも患者にとって主体感があるような学習」である[2]。

本研究では, 上記の学習を実現するために VR に着目し, 主体感の付与を認知リハビリテーション領域において, VR 環境で体系的に実現することを想定し, 最適な介入方法を提案することを目的とした。

2. 主体感のモデル定義と仮説

主体感(Sense of Agency)とは, 「自己が営為の作用主体であるという感覚」などと定義される。もっとも代表的な主体感は運動についての運動主体感であり, 主に順モデル(目標・予測・実際の運動の関係から主体を判断する)に基づいて研究がおこなわれている。

2.1 認知領域における主体感

本研究は認知リハビリ領域を背景とし, 認知的な意味を伴う行為について主体感を扱う必要がある。そこで, 視線の運動に関係が深い認知的行為である注意および選択について, 視線誘導による運動的な介入を行うことを想定し, 運動主体感を拡張したモデルを定義した。

2.2 介入による主体感への影響

運動への介入によって感覚的な違和感が生じたときには, 高次の認識に基づいて主体の判断が行われる場合がある。Wen らが運動に介入を行った実験では, 運動主体感を低下させるのは「感覚レベルの違和感」のみであり, 「アシストの高次の意味の認識」は影響を与えないとされた[3]。

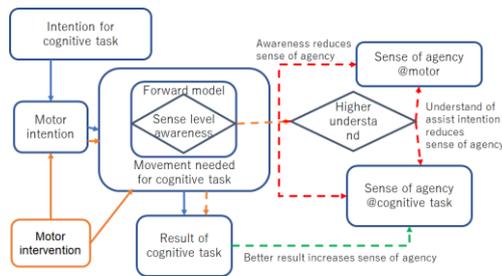


Fig. 1 Sense of agency model on execution of a cognitive task.

2.3 認知的課題遂行における主体感のモデル

認知的課題遂行に、視線誘導によって行為に介入する場合の主体感を Fig.1 のモデルで定義した。

2.4 主体感が高まる介入の仮説

「介入の強さが調節でき、かつ介入の強さが一定以下では感覚レベルの違和感を生じない」と仮定し、その閾値を Detection Threshold(DT)と定義した。仮定より、主体感を最大化する介入の強さは DT 付近である。

3. VR リハビリシステムのコンセプト

3.1 VR 分野の視行動誘導手法

主体感を付与した認知領域への介入は、現実世界では困難であるが、VR 分野ではこの条件を満たす可能性のある手法が提案されている。一般的に VR 環境でユーザーの視線を誘導して行動を制御する(視行動誘導)には、矢印などの記号や光の点滅といった明示的な情報提示を用いることが多い。他方、VR コンテンツの改変を最小限に抑え、ユーザー体験を損なわずに行動を制御する目的で、非明示的な視線誘導手法である後述のリダイレクション・Semantic Depth of Field(SDoF)が提案されており、主体感を付与した介入への応用が期待できる。

3.2 VR による遂行機能リハビリ課題

VR の利用は、リハビリの課題内容にも利点をもたらす。これまでに、医学的・臨床的な場面において認知機能の回復が可能な事例が示され始めているが、それらは認知機能への個別要素的な介入に留まる。しかし、個別要素的な学習は、遂行機能が関与する手段の日常生活動作など、実際に生活をおくるための複雑な活動に対して効果が期待できないことが報告されている[4]。つまり、実用的な認知機能学習には、日常生活場面のタスクを一連の流れのまま訓練する必要がある。現実世界においてそのようなタスクを、意欲を高めながら実施することは現実的ではない。一方、VR 分野では脳機能検査や学習を目的として、買い物や料理などを一連の流れとして再現する手法が提案されている[5]。

本研究は、先行研究と同様に VR で再現された日常生活場面を課題として無誤学習するシステムをコンセプトとしているが、主体感のある介入手法の提案を行う点の特徴としている。

4. 誘導手法の実装

4.1 開発環境

HMD およびアイトラッキングに HTC 社の VIVE Pro Eye を使用した。開発は Unity 2018.4.20f1 を基本とし、VR 開発の基本ツールである SteamVR、アイトラッキング情報の取得に SranipaRuntime を使用した。

4.2 リダイレクションの概要と実装

被験者の現実空間(RE)での運動を忠実に VR 空間(VE)に再現するのではなく、何らかの修正を加えた運動として VE に再現することを基本とする。前述の Aoyagi らの手法は、手の運動についてこの発想を用いている。本研究では、これを視線方向について修正を加えるリダイレクションを用いる。視線方向とみなす方向は HMD 正面方向として得られる頭部方向、またはアイトラッキングで得られる注視点方向が利用でき、本研究では双方について実装した。

VE に対する視線角速度の修正は、VE と RE の座標系を両者共通の鉛直方向軸を回転軸として、VE に対し RE の座標系を回転させることで行った。

先行研究では視線角速度の修正を主に線形に行っており、式(1)のように表される。ゲインが一定以下(先行研究では頭部運動で 0.3 程度[6]、眼球運動で 0.07 程度[7])では、被験者はリダイレクションのかかった運動を自分の運動と区別できないとみなすことができる。

$$\omega_{VE} = \omega_{RE} \times (1 \pm G) \quad (1)$$

ω_{VE} : VE における視線方向の角速度の水平成分

ω_{RE} : RE における視線方向の角速度の水平成分

G: ゲイン (正の実数)

本研究ではゲインの符号を切り替えることで視線の誘導を行った。つまり、視線方向の水平成分が頭部-ターゲット方向の水平成分に対し、接近している場合は正のゲイン、離反している場合は負のゲインを適用する。つまり、水平方向において視線がターゲットに接近する場合は加速され、離反する場合は減速される。すなわちターゲットに視線が引き寄せられるような挙動が実現する。

また、注意・選択への介入場面で違和感を低減するように、ゲインの項を工夫した。

$$G = G_{fixed} \times A_{pitch} \times A_{tgt} \times A_{eye} \quad (2)$$

G_{fixed} : VE 環境の状態に影響されない定数(正の実数)

A_{pitch} : 視線方向がピッチ方向に大きく振れたとき、ゲインを低下させる

A_{tgt} : 視線方向の水平成分が頭部-ターゲット方向の水平成分またはその 180[deg]反対方向に近いとき、ゲインを低下させる

A_{eye} : 眼球運動の角速度が 180[deg/s]未満のとき、眼球運動を修正するリダイレクションのゲインを 0 にする。

A の項はいずれも 0~1 を値域に取る関数で実現したため、ゲインの範囲は $0 \leq G \leq G_{\text{fixed}}$ となる。 G_{fixed} を変更することで、リダイレクションの強さを調整する。

4.3 Semantic Depth of Field (SDoF)の概要と実装

人間は、視野内に比較的明瞭(シャープ)な領域と比較的不明瞭(ぼかしのかった)領域が共存するとき、明瞭な領域を注視しやすいという無意識レベルでの特性(視覚的顕著性)を持つ。これを利用し、ユーザーにとって重要度の高い情報を明瞭、そうでない情報を不明瞭に表示する。

視覚的顕著性に基づく視線誘導効果は、被験者が視野内の明瞭さの分布を意識的に認識していない場合にも起こりうる。SDoF を HMD に適用した先行研究では、視線誘導の効果が認められたものの、実装に関する知見が少ないため、本研究では VE で扱いやすい実装を考案した。

- ① HMD 画面に勾配のあるぼかしの効果を与えること、
 - ② その勾配のパターンを、ターゲットに誘導効果を与えるよう HMD 視野上の位置を制御すること
- という 2 段階に分けて仕様を決定した。

4.3.1 ぼかし効果および勾配の実現

ぼかし効果の原理として、平均化フィルターを採用した。利点は連続的にぼかしの強さを変化させられることである。欠点は描画負荷の増大だが、本研究の実験においては VR のパフォーマンスに影響を与えなかった。

VR では、ぼかし等のエフェクトも、VE における 3 次元的な意味を持つ。そこで「VE のあるオブジェクトを透過して描画された背景がぼかされる」という形で、VE においてぼかし効果に空間的な整合性を取れるように、かつ HMD 画面全体に適用した。更に、描画順序を調整することで、VE における位置関係を無視してぼかし効果を適用した。ぼかしの強さの勾配は、オブジェクトに適用するテクスチャの明るさの勾配によって定義した。また、勾配の部分を含めた全体的なぼかしの強さは最大ぼかし強度係数を設定することで任意に決定でき、これを誘導の強さのパラメーターとした。

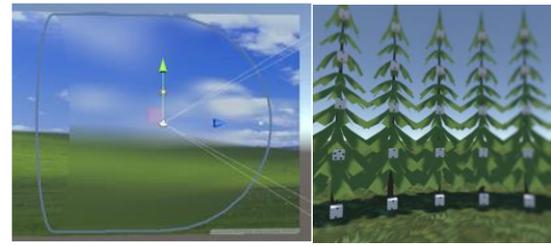
ぼかし効果オブジェクトの外観を Fig.2(a) に示す。半球部分にぼかしの強さの勾配を与え、先端部を明瞭にした。この部分の半径は VE において 10m とした。

4.3.2 誘導を実現する制御

ぼかし効果オブジェクトを、カメラ位置に対し相対位置を固定した。更に、カメラ-ターゲット方向に半球部分の中心方向を向けるように回転する制御を加えた。このとき、完全にターゲット方向に向くのではなく、HMD 正面方向を基準に 30°]以下の回転に制限するようにした。これにより、ターゲットが HMD 画面内に存在するときはターゲット周辺を、HMD 画面外の方向に存在するような場合にはターゲットへの最短経路となる方向を、それぞれ SDoF により提示できる。

4.4 誘導手法の併用

本研究のリダイレクション(頭部運動・眼球運動)、SDoF は、互いに競合しないように実装したため、任意の 2 手法、または 3 手法全てを同時に適用することができる。



(a) Object with blur effect surrounding camera (b) Visual exploration task

Fig. 2 An Example of visual exploration task

5. 誘導手法の評価実験と考察

5.1 VR 探索課題の開発

視線誘導による注意・選択への介入を評価するために、VR で視覚的探索を行う課題を開発した。VE で被験者を取り囲むように配置された多数の箱の中から 1 つだけ外見の異なるターゲットの箱を発見し、HMD またはコントローラー操作で選択することを繰り返す課題(Fig.2 (b))である。

5.2 Detection Threshold 測定実験

VR 探索課題に誘導手法(頭部運動のリダイレクション・眼球運動のリダイレクション・SDoF)を 1 種ずつ適用し、時間経過とともに誘導の強さ(リダイレクションのゲイン G_{fixed} または SDoF の最大ぼかし量係数)が 0 から増加していくようにした。DT を測定するため、被験者はターゲット探索を繰り返す中で、誘導の存在または感覚的な違和感を確信した時点で申告する。被験者には、与える誘導の概要を事前に説明した。結果を Fig.3 に示す。

リダイレクションの DT は、頭部運動、眼球運動の場合ともに先行研究で DT に相当する代表的な値[5][6]の約半分程度となった。VR 探索課題では精密な注視を要するため視野の動きに敏感になったためと考えられる。

SDoF は、VR における DT を定量比較できる先行研究が存在しないが、本実験の手法により VR における SDoF の DT の測定が可能であることが示された。ヒアリングにより、頭部運動のリダイレクションと SDoF において DT の個人差が比較的大きい理由として、HMD 自体の違和感と誘導手法による影響の区別が困難であることが示唆された。眼球運動のリダイレクションで DT の個人差が比較的小さい理由は、実装において補正 A_{eye} により、知覚しやすい不連続な視野の動きが生じたことが考えられる。

5.3 主体感とパフォーマンスを高める手法の選定

DT の個人差を正規分布と仮定し、前節の実験結果から 9 割の人が感覚レベルの違和感を認知する誘導の強さの条件 ($DT \geq 90$)、また 9 割の人が認知しない条件 ($DT < 10$) を得た。これらの条件で、VR 探索課題を行い、感覚レベルの違和感(視覚、運動感覚)、探索における主体感、継続意欲についてアンケート調査した。感覚レベルの違和感が大きい場合、主体感は低下する可能性があり[3]、それは継続意欲の低下につながる。また、ターゲット探索時間をもとにスコアを算出し、誘導によるパフォーマンス増加の効果を調査した。スコアは被験者に随時提示した。

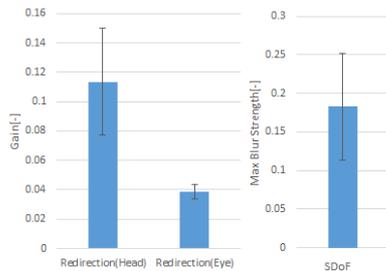


Fig. 3 Detection threshold of gaze guidance methods (Average and standard division, n=5, Age 23-31)

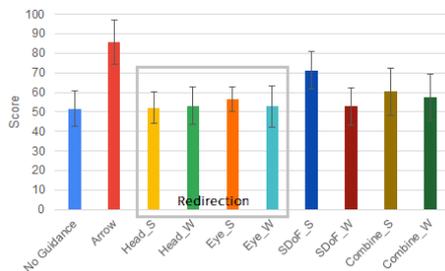


Fig. 4 Task score by gaze guidance methods (Average and standard division, n=7, Age 23-31)

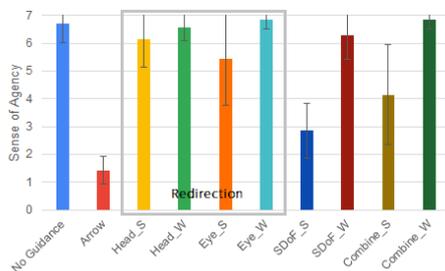


Fig. 5 Sense of agency by gaze guidance methods (Average and standard division, n=7, Age 23-31)

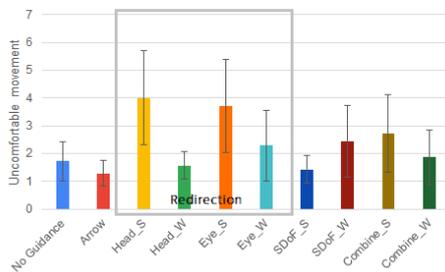


Fig. 6 Movement uncomfortable level by gaze guidance methods (Average and standard division, n=7, Age 23-31)

実施した誘導および強さの条件は、リダイレクション(頭部運動)・リダイレクション(眼球運動)・SDoF・3手法併用のそれぞれについてDT<10(Fig.4以降でWと表記)・DT≥90(Fig.4以降でSと表記)で調査した。比較のため、誘導を全く行わない無誘導条件と、立体的な矢印を提示する明示的な誘導についても実施した。

無誘導条件より明らかに高いスコアは、矢印による誘導(+約34点)と、SDoF(DT≥90)(+約20点)であった(Fig.4)。

本研究は無誤学習を想定しており、パフォーマンス向上の観点から有用な手法は上記2手法に限定された。

矢印による誘導と、SDoF(DT超過≥90)の主体感は、どちらも無誘導に比べて低くなっているが、SDoF(DT≥90)のほうが高い主体感を与える傾向(主体感の指標で+1.4ポイント)が示された(Fig.5)。したがって、パフォーマンス向上と主体感付与を両立した手法はSDoF(DT≥90)のみであり、これが本研究から提案される手法である。

リダイレクションは、手法や条件によらずパフォーマンス・主体感の指標が無誘導の場合とほとんど変わらなかった。ところが感覚レベルの違和感(運動感覚についてFig.6に示す)はSDoF(DT≥90)と同程度以上に生じていた。

したがって認知的課題遂行においては、介入によって感覚レベルの違和感を生じて、パフォーマンスに寄与しない場合(アシストとして活用できなかったと考えられる)は主体感を低下させないことが明らかになった。

6. 結言

認知領域の課題遂行に主体感を付与して介入する手法として、SDoFを用いたVRの視行動誘導手法を提案した。手法間比較から、認知機能の領域では主体感について「感覚レベルの違和感」よりも「アシストの高次な意味の認識」が支配的であることが明らかになった。

謝辞 本研究は、株式会社 ユニマツ リタイアメント・コミュニティとの共同研究で実施した。

参考文献

- [1] K. Aoyagi, W. Wen et al. : "Improvement of Sense of Agency During Upper-Limb Movement for Motor Rehabilitation Using Virtual Reality," 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (2019).
- [2] 衛然, 他3名 : "視行動誘導により行為主体感を付与した遂行機能無誤学習VRシステムの提案," 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, (2020).
- [3] W. Wen et al. : "The Sense of Agency during Continuous Action: Performance Is More Important than Action-Feedback Association," PLoS ONE, 10(4), (2015).
- [4] Ge.W. Rebok et al. : "Ten-Year Effects of the Advanced Cognitive Training for Independent and Vital Elderly Cognitive Training Trial on Cognition and Everyday Functioning in Older Adults," JAGS, 62(1), p16-24, (2014)
- [5] 山口武彦, 藤野響, S. Polat, 他6名 : "人型エージェントとの協調認知的コミュニケーションを介したErrorless Learningシステムの提案:予備的実験と考察," 情報処理学会研究報告, (2015).
- [6] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald et al. : "Estimation of detection thresholds for redirected walking technique," IEEE TVCG, 16(1), pp. 17-27, (2010).
- [7] Q.Sun, A. Patney, L.Wei et al. : "Towards Virtual Reality Infinite Walking: Dynamic Saccadic Redirection," ACM Transactions on Graphics, (2018)