



# 躍度最小モデルにより伸長するバーチャル腕の身体性

屋敷駿斗<sup>1)</sup>, 村上太一<sup>1)</sup>, 北崎充晃<sup>2)</sup>

Hayato Yashiki, Taichi Murakami, and Michiteru Kitazaki

1) 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 情報・知能工学専攻

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, yashiki.hayato.wf@tut.jp, murakami.taichi.ju@tut.jp)

2) 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 情報・知能工学系

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, mich@cs.tut.ac.jp)

**概要:** 伸長するバーチャル腕の身体性認知は、その伸長方法の影響を受ける。本研究では、人の運動モデルとして知られる躍度最小モデルによる伸長が、定速伸長や加速伸長よりも高い身体化をもたらすかを検討した。参加者は、自動的に伸びるバーチャル腕を用いてターゲットに触れる課題を行った。その結果、躍度最小による伸長は、加速条件に比べて身体所有感と行為主体感の評価が高いことが示された。

**キーワード:** 身体性認知、拡張身体、躍度最小化モデル

## 1. はじめに

### 1.1 バーチャルな腕の伸長

身体所有感や人間拡張の研究では、バーチャルな身体やロボットを対象とし、通常の身体を超える機能を実装する。例えば、腕をインタラクティブに伸ばす技術開発として、Go-Go インタラクション技法がある[1]。また、伸長するバーチャルな腕の伸長方法の違い(等倍条件・加速条件・瞬時条件)により、身体所有感、行為主体感、課題成績に差異が生じることが報告されており、身体所有感・行為主体感は等倍・加速・瞬時の順で高く、課題成績は等倍・瞬時・加速の順で高くなった[2]。

しかし、先行研究のバーチャルな腕の伸長においては、人の自然な動きを活用していない。そこで、本研究では人の滑らかな腕の動きの特徴を再現するための数学的モデルの 1 つである躍度最小化による伸長が身体化を促進するか検証を行った[3]。

### 1.2 仮説

人の自然な運動制御である躍度最小化による腕の伸長は身体化を促進すると予想した。具体的には、身体所有感および行為主体感、ユーザビリティにおいて、躍度最小化条件・等速条件・加速条件の順で高くなると予想した。

## 2. 方法

### 2.1 参加者

実験の目的を知らない 28 名の学生が実験に参加した(女性 1 名、男性 27 名、平均 22.1 歳、標準偏差 1.89、右利き 25 名、両利き 1 名、左利き 2 名)。後述する伸長条件 3 条件×ターゲット 2 条件の計 6 条件の分散分析、効果量中  $f=0.25$ 、 $\alpha=0.05$ 、 $\text{power}(1-\beta)=0.8$  として G\*Power 3.1 で例数設計をすると  $N=28$  となることから、サンプル

サイズとして 28 名を選択した。

本研究は豊橋技術科学大学人を対象とする実験倫理審査委員会の承認を得て実施され、実験はその内容に従って実施された。参加者はインフォームド・コンセントを理解し、同意書に署名した上で実験に参加した。また、参加者は裸眼または矯正視力、身体能力が正常な状態であった。

### 2.2 装置

バーチャル空間は Unity (2023. 2. 20f1) を用いて生成・制御され、コンピュータ (11 th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11700 @ 2.50GHz、Intel(R) UHD Graphics 750、MS-Windows 10) によりヘッドマウントディスプレイ (HMD, VIVE Pro Eye) に表示された。また、腕にはトラッカー (Vive Tracker(3.0)) をベルクロバンド (Vive Tracker Strap-Palm) を用いて取り付け、バーチャル空間で両腕を動かすことを可能にした。

### 2.3 バーチャル空間

生成されたバーチャル空間において、参加者の位置から前方に 0.4m 右に 0.35m、床から高さ 1m に腕を置く初期位置 (0.2×0.05×0.2) を作成し、初期位置の先端から前方 2m にターゲット (直径 0.15m の黄色球) を配置した。

### 2.4 伸長条件

伸長条件として、等速条件・加速条件・躍度最小化条件を作成した。等速条件・加速条件においては、1.1 で述べた先行研究で使われた等倍条件・加速条件を参考にし、先行研究とは違う式を用いて計算した。等速条件 ( $4t$ 、 $t$ : 経過時間)、加速条件 ( $512t^8$ 、 $t$ : 経過時間)、躍度最小化条

件  $(x_0 + (x_f - x_0) \times (6(t/t_f)^5 - 15(t/t_f)^4 + 10(t/t_f)^3))$ 、  
 $t$ :経過時間、 $t_f$ :目標時間、 $x_0$ :初期位置、 $x_f$ :目標位置)の式で計算を行い、いずれも 0.5s で 2m 先に腕が到達するよう制御を行った。

2.5 ターゲット条件

ターゲット条件としては、全正答と半正答の 2 条件を設定した。全正答条件は自動的に手がターゲットに当たり、半正答条件はランダムに半数は手がターゲットに当たるが、半数は手がターゲットから外れる条件とした。ターゲット条件は、行為主体感が課題成績の影響を受けることから設定した[4]。

本研究の外れ条件は、透明なターゲットに向かい腕を伸ばすことで実現した。初期位置からメインとなるターゲットまでの距離が 2m であるため、外れのターゲットも常に初期位置から 2m の距離に出現させるために 3 次元の極座標を用いた。X 軸:  $x=r\sin\theta\cos\phi$ 、Y 軸:  $y=r\sin\theta\sin\phi$ 、Z 軸:  $z=r\cos\theta$ 、 $r=2$ 、 $\theta=5\text{deg}$ 、 $0\text{deg}<\phi<360\text{deg}$  の式でハズレのターゲットを出現させた。 $\theta$  でメインとなるターゲットからの角度を制御し、 $\phi$  でハズレのターゲットが出現する位置を制御した。

2.6 質問紙

身体所有感(Q1、Q2)・行為主体感(Q3、Q4)の質問紙に 7 段階のリッカートスケール、ユーザビリティの質問紙 System Usability Scale (SUS) (Q5~Q14)に 5 段階評価で回答した(表 1)。質問紙は Q1~Q4、Q5~Q14 間でランダムな順番で参加者に表示した。また、全ての試行が終わった際には利き手質問紙(フランダース)にも回答した。

表 1: 身体所有感・行為主体感・SUS の質問紙

Q1: パーチャルな身体が自分の身体であるかのような感覚を覚えた
Q2: パーチャルな身体が他者の身体であるかのような感覚を覚えた
Q3: パーチャルな身体を自分が操作しているように感じた
Q4: パーチャルな身体を他者が操作しているように感じた
Q5: このシステムはしょっちゅう使いたくなると感じた
Q6: このシステムは必要以上に複雑だと感じた
Q7: このシステムは使いやすいと感じた
Q8: このシステムを使えるようになるためには専門家の助けが欲しいと思った
Q9: このシステムにはいろんな機能がうまくまとまっていると感じた
Q10: このシステムにはちぐはぐな点が多すぎると感じた
Q11: たいいていの人がこのシステムの使い方をすぐに身につけるだろうと感じた
Q12: このシステムはとても使いにくいと感じた
Q13: このシステムを使いこなせると感じた
Q14: このシステムを使えるようになるまでに習うことが多かった

2.7 手続き

参加者は、暗室内の印の位置に立ち、その後 HMD、トラッカーを装着し VR 空間に入った。VR 空間では初期位置に指の先を合わせ待機し、初期位置の色が変化したら手先を 1cm 延ばすことで、自動的にバーチャルな腕はターゲットに向かって伸長した(図 1)。

等速条件・加速条件・躍度最小化条件による伸長条件(3)と正答・半正答によるターゲット条件(2)の計 6 条件をランダム順で 2 回繰り返した。



図 1: 伸長腕によるリーチングの例

3. 結果

3.1 身体所有感

伸長条件 3 条件、ターゲット条件 2 条件の計 6 条件 2 回分のデータの平均値を求め、分散分析 (ANOVA) を行った。その結果、身体所有感には交互作用があった。次に、多重比較と単純主効果を分析した結果、全正答条件では、躍度最小化条件と等速条件は加速条件よりも有意に高かった ( $p<0.05$ )。等速条件では、全正答条件が半正答条件よりも有意に高かった ( $p<0.05$ ) (図 2)。躍度最小化条件でも、全正答条件が半正答条件間よりも有意差に高かった ( $p<0.01$ ) (図 2)。

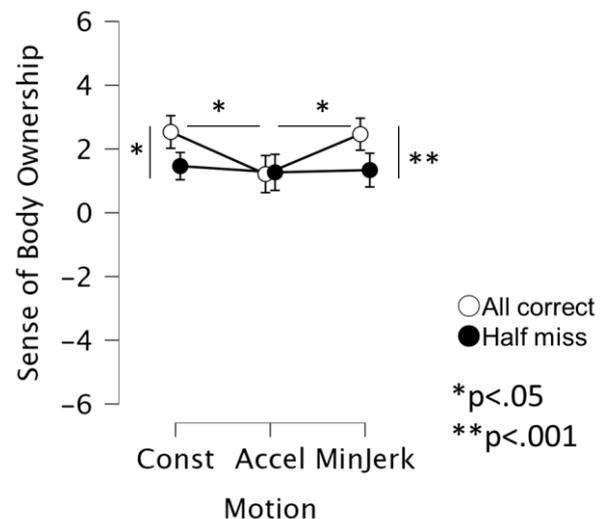


図 2: 身体所有感の結果

3.2 行為主体感

伸長条件 3 条件、ターゲット条件 2 条件の計 6 条件 2 回分のデータの平均値を求め、分散分析 (ANOVA) を行った。

その結果、行為主体感には交互作用があった。次に、多重比較と単純主効果を分析した結果、全正答条件では、躍度最小化条件が加速条件よりも有意に高かった ( $p < 0.05$ )。躍度最小化条件では、全正答条件が半正答条件間よりも有意に高かった ( $p < 0.05$ ) (図 3)。

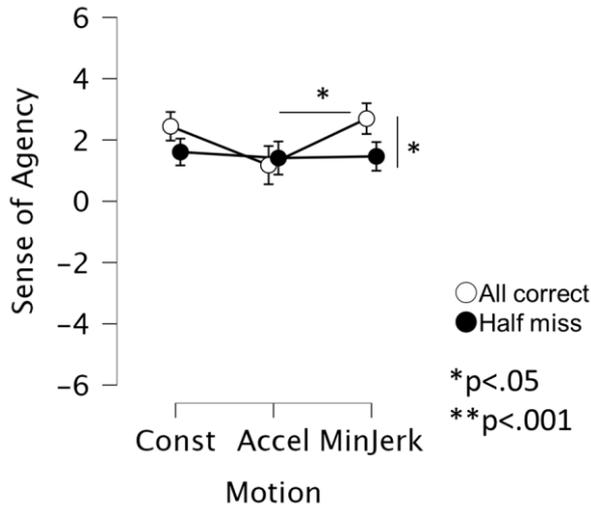


図 3: 行為主体感の結果

3.2.1 ユーザビリティ (SUS)

伸長条件 3 条件、ターゲット条件 2 条件の計 6 条件 2 回分のデータの平均値を求め、分散分析 (ANOVA) を行った。その結果、SUS には交互作用がなかった。しかし、主効果を見ると全正答条件は半正答条件よりも有意に高かった ( $p < 0.001$ ) (図 4)。

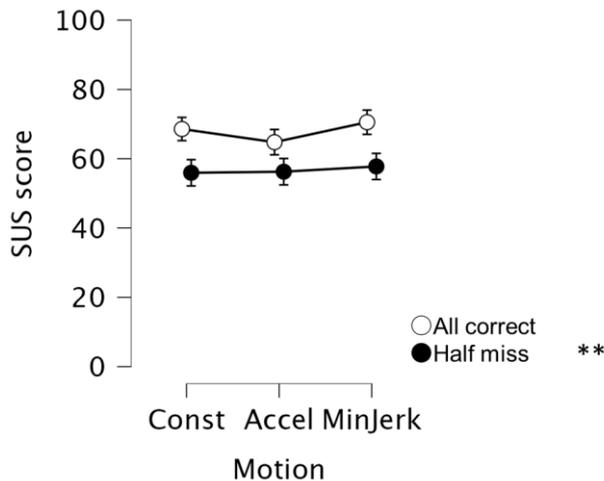


図 4: SUS の結果

4. 考察

4.1.1 結果のまとめ

本研究では、バーチャル環境における伸長する腕が伸長方法の違いにより身体化にどのような影響があるか検討した。実験の結果、課題成績が高い場合、身体所有感は躍度最小化条件・等速条件が加速条件よりも向上し、行為主体感は躍度最小条件で加速条件よりも向上した。また、課題成績が低い場合、等速条件・加速条件・躍度最小化条件などの運動性の違いは身体背性に影響せず、課題成績の影響の方が大きく影響した。ユーザビリティにおいても、課題成績の影響が大きく、課題成績が良いと使いやすく感じることが分かった。

4.1.2 今後の課題

本研究では、仮説として躍度最小化による伸長は身体化を促進すると予想した。行為主体感において躍度最小化条件のみ加速条件との間で有意差が生まれたことから、躍度最小化条件が等速条件より優れている可能性を示唆できるが、結果として等速条件と躍度最小化条件間に有意な差はなかった。ただし、本研究では腕が 2m を 0.5s で到達するように設定していたため、等速条件と躍度最小化条件では速度の違いを知覚しづらかったことが懸念される。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (JP23K17460) の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghorst, S., & Ichikawa, T. (1996, November). The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR. In Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology (pp. 79-80).
- [2] 中川航太朗、井上康之、Harin Hapuarachchi、杉本麻樹、稲見昌彦、北崎充晃 (2022) . 伸長する腕に対する身体性の獲得: 伸長実装法による違い. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 27(4), 341-351.
- [3] Flash, T., & Hogan, N. (1985) The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model. The Journal of Neuroscience, 5(7), 1688-1703.
- [4] Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H. (2015). The sense of agency during continuous action: performance is more important than action-feedback association. PloS one, 10(4), e0125226.