

Asura Hands: 拡張された2本目の左腕に対して 身体性転移を促す順応課題

○河口 諒紀 (東京都立大学), 岡本 正吾 (東京都立大学),

阿部 裕太郎 (東京都立大学), 後藤 優太 (東京都立大学), 原 正之 (埼玉大学)

Asura Hands: Adaptation tasks fostering the transfer of self-body awareness to the extended second hand

○ Asaki KAWAGUCHI (TMU), Shogo OKAMOTO (TMU), Yutaro ABE (TMU), Yuta GOTO (TMU),
and Masayuki HARA (Saitama University)

Abstract: As one of the body extensions, we prepared two extended CG left hands and investigated the elements necessary for the adaptation task to generate a strong sense of body ownership and agency. The results of the experiment showed that a sense of body ownership and agency occurred in less difficult tasks and that the hand movement component was not relevant.

1. 緒言

身体拡張は、人間に機械的な身体部品を追加で取り付けることによって、人間の身体機能を拡張することを目的としている。例えば、PariettiとAsadaは、装着者の組み立て作業を補助するための、ロボットの追加アームを開発した¹⁾。ロボットの手足に関わるこれらの研究のほとんどは、その制御方法に主眼を置いている。没入型バーチャルリアリティ (VR) 環境では、コンピュータグラフィックス (CG) のアバタへ身体性が転移される^{2)~4)}。人体に装着された部品が自分の身体の一部として感じられ、それに対して身体性転移を起こすことができれば、人体になじむ身体拡張技術が実現できる。

身体性転移の強さを測定するためには、個人が転移の対象に対して感じる身体所有感と運動主体性を調査するのが一般的である。VR環境下での身体性転移というシナリオにおいては、身体所有感は、目に見えるCGの身体部分が自分の身体に属しているという感覚である。運動主体性とは、CGの身体部分や道具の運動をコントロールできるという感覚である。これらの感覚は、アンケートや人間の行動の測定によって調査される^{5)~9)}。例えば、Kawaguchiら⁹⁾は、同時に表示される2本のCG手腕に対して感じられる身体所有感と運動主体性を検証した⁹⁾。

身体性転移の実験では、順応課題が行われる。しかし、身体性転移を起きやすくするための最適な順応課題はわかっていない。そこで、本研究では、異なる手の動作要素を含む5つ順応課題を用意し、2本のCGの左手に対する身体所有感と運動主体性の強度を比較した。

2. 実験方法

2.1 評価者

評価者は男女10名(20歳以上)であり、いずれも事前に研究の目的を知らなかった。

2.2 実験装置

没入型VR環境のため、バーチャル・リアリティ・ゴーグル (Meta Quest3, Meta Platforms, Inc., USA) を使用した。これは、片目当たり2064×2208ピクセルの解像度の映像を提示し、本実験の環境下では画像の更新周期が72Hzであった。また、両手首から両手の指先までを内臓カメラによって認識し、ハンド・トラッキングが可能である。

仮想空間とCGの実装にはUnity (2020.3.35.f1, Unity Technologies, USA) を用いた。参加者は、両手を動かしても周囲の障害物に当たらないような空間で椅子に座った。

2.3 本物の右手で見えている左手を操作する方法

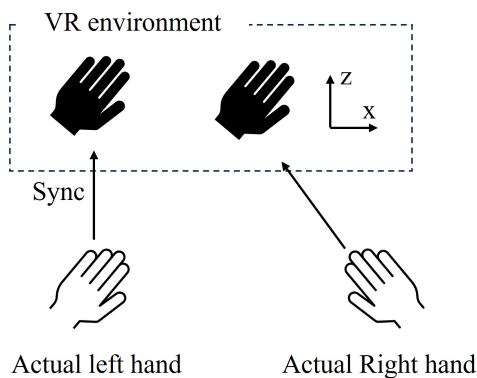
VR環境では、左手で操作するCGは実際の左手と同期していた。一方で、VR環境で表示される左手のCGの1つは、右手で操作された。この操作方法について、ミラー条件とラインダンス条件の2条件を用意した。

Fig. 1 (a) に、ミラー条件での手の動きを示す。この条件では、実際の右手の動きをすべて左右反転させて表示した。手首の動きも左右反転しており、y軸回転やz軸回転がCGでは逆になった。また、腕全体の動きは右腕と同期しており、右腕を左右・上下・前後へ動かすとCGも左右・上下・前後に動いた。

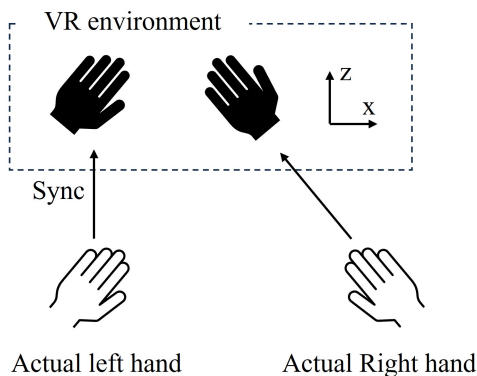
Fig. 1 (b) に、ラインダンス条件での手の動きを示す。CGは左手として表示するものの、手首の動きが実際の右手と一致していた。y軸回転やz軸回転がCGでは逆にならなかった。また、腕全体の動きは右腕と同期していた。

2.4 順応課題

参加者らは、2つのCG腕を用いて、5種類の順応課題を実施した。これらの課題は、Table 1のように、いずれも異なる手の動作要素を含んでおり、身体所有感と運動主体性に異なる影響を与えると考えられた。手の動作要素は、「指を動かすか」、「手を裏返すか」、「左右方向の移動があるか」、「上下方向の移動があるか」、



(a) Mirror condition.



(b) Line-dance condition.

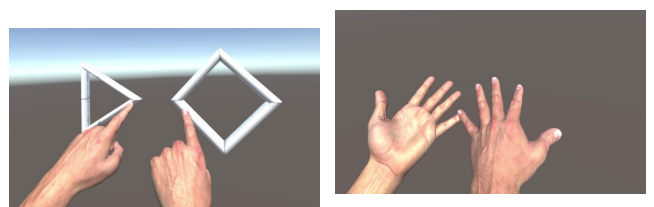
Fig. 1 CG of the two left hands.

「手以外のCG (課題で用いられたCG) に触るか」、「手のCG同士で接触するか」、そして「両方の手を同時に動かすか」であった。

課題の1つ目は、Fig.2 (a) のようなCGをなぞるという課題である。一方は正三角形であり、もう一方は正方形であった。参加者は、これらを両手を使って同時になぞった。

2つ目は、Fig.2 (b) のように両手をつなぎ、その後両手を同時に裏返すという課題である。まず、参加者は両方のCGの手の小指を合わせた。次に、両手を裏返し、両方のCGの手の親指を合わせた。そして、もう一度裏返し、最初の状態へ戻した。参加者は、これらの動作を繰り返した。

3つ目は、Fig.2 (c) のように片方の手でもう一方の

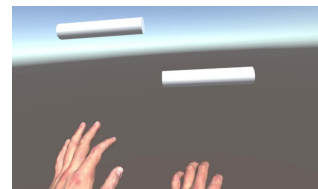


(a) Trace the CG

(b) Turn over both hands at the same time.



(c) Stick fingers in the other.



(d) Hold two sticks at the same time.



(e) Move the finger on which the sphere appeared.

Fig. 2 Five types of adaptation tasks.

手の指を刺していく課題である。一方のCGの手のひらを上向きにし、その指先を1つ1つ、もう一方のCGの手の人差し指で刺していった。親指から小指まで刺した後、ふたたび親指から刺した。

4つ目は、Fig.2 (d) のような棒がランダムに出現するため、それをつかむ課題である。棒は参加者の前のランダムな位置に2本出現し、参加者は、それらを同時につかんだ。つかむと棒は消えた。これを参加者は繰り返した。

5つ目は、Fig.2 (e) のようにCGの指に球が出現し、その指を動かすという課題である。まず、参加者は両手を体の前に突き出した。その後、球が10本の指のどこかにランダムに出現した。参加者は、球が出現した指を動かした。参加者が指を動かすと、球は消え、新たな位置に球が出現した。

2.5 実験手順

実験を開始すると、ゴーグルに仮想空間と、2本の左手のCGが表示された。実験課題は、合計で10種類であった(ミラー条件もしくはラインダンス条件×5種類の順応課題)。参加者は1分間、これらの課題のうち1つを行った。10種類の課題はランダムな順で実施された。それぞれの課題について、30秒でCGの左右を入れ替えた。1つの課題の終了後、参加者はゴーグルを外し、2.6節で述べられるアンケートに回答した。アンケート回答後に、少なくとも1分の休憩をはさみ、参加者は次の課題に取り掛かった。結果として、課題間のインターバルは3分以上であった。

2.6 アンケート

Table 2はアンケート内容を示す。参加者はアンケートを10段階のリッカート尺度で回答した。0を「タスク中を通じて1度も感じなかった」、1を「ほんの少し

Table 1 Task classification

	Fig	Turn	Stick	Bar	Sphere
Move fingers	×	×	○	○	○
Turn over	×	○	×	×	×
Move to L and R	○	×	○	×	×
Move up and down	○	×	○	○	×
Touch CGs of tasks	○	×	×	○	○
Touch CGs of hands	×	○	○	×	×
Move hand	○	○	×	○	×
Simultaneously					

Table 2 Questionnaire items

Q1	右手で操作していた手が自分の手のように感じた
Q2	右手で操作していた手が自分の左手のように感じた
Q3	右手で操作していた手が自分の右手のように感じた
Q4	左手で操作していた手が自分の手のように感じた
Q5	左手で操作していた手が自分の左手のように感じた
Q6	左手で操作していた手が自分の右手のように感じた
Q7	見えていた両方の手が同時に自分の左手のように感じた
Q8	見えていた両方の手を同時に制御できていた
Q9	右手で操作していた手を制御できていた
Q10	左手で操作していた手を制御できていた
Q11	自分の本当の左手が誰かに操作されているように感じた
Q12	タスクの難易度 (1: easy, 9: difficult)

でも感じた」, 9を「とても感じた」とした。

Q1-Q5は身体所有感に関する質問であった。Q7-Q10は運動主体性に関する質問であった。Q12は、タスクの難易度を尋ねており、9段階で回答された。1を「簡単」、9を「難しい」として回答した。この項目は、各タスクの難易度とCG手に対する所有感および運動主体感の関係を調査するために設けた。Q6とQ11は示唆性を調査するための、コントロール質問であり、0に近いスコアとなることが期待された。

2.7 データ解析方法

各アンケート項目の採点に、二元配置反復測定分散分析を適用した。要因は「順応課題」と「条件(ミラー条件かラインダンス条件か)」とした。二元配置分散分析は10回行ったため、ボンフェローニ補正を行った。また、難易度とアンケートの結果の相関を算出した。

3. 結果

Fig. 3, 4にアンケートの結果を示す。コントロール質問のスコアは、0を有意に超えなかった($p > 0.05$)。Table 3に二元配置分散分析の結果を示す。Q8, Q9, Q10, Q11(運動主体性), そしてQ12(難易度)について、課題によるスコアへの影響があった。条件による影響は、どのアンケートにおいても無かった。Q9(右手への運動主体性)については、交互作用が有意であるため、課題による影響が条件によって変わる。

Q2, Q4, Q8, Q9, Q10, Q11では、図形をなぞる課題のスコアが低く、棒をつかむ課題や表裏にする課題、指を刺す課題のスコアが高い傾向にあった。一方、難易度については、図形をなぞる課題と球を動かす課題の

スコアが高かった。また、コントロール質問を除いたアンケートのスコアと難易度のスコアには負の相関があった(Q1: $r = -0.74$, Q2: $r = -0.59$, Q3: $r = -0.34$, Q4: $r = -0.58$, Q5: $r = -0.51$, Q7: $r = -0.57$, Q8: $r = -0.82$, Q9: $r = -0.82$, Q10: $r = -0.86$)。

4. 議論

本研究では、独立した2本の左手の操作方法としてミラー条件とラインダンス条件を用意した。実験の結果、アンケートのスコアにこの2条件の有意差は見られなかった。これは、参加者の好みが生じたと考えられる。内省報告では、どちらか一方のほうが扱いやすかったと答えた参加者が複数いた。

また、本研究では、順応課題の比較を行った。二元配置分散分析の結果、身体所有感のスコアに有意な差は見られなかった。一方、運動主体性のスコアに有意差があった。また、難易度においても有意差があった。さらに、難易度と身体所有感、難易度と運動主体性に相関があった。これらの結果から、難易度が低い順応課題ほど身体性転移が起きやすいといえる。難易度が低いことで、課題中にミスが起きにくく、参加者は想定通りに動かせたと感じていたと考えられる。

また、順応課題は手の動きに応じて分類を行った。難易度を除くアンケートのスコアは、棒を掴む課題・手を表裏にする課題・指を刺す課題が高かった。しかし、分類表においてはこれらの課題に共通する要因はなかった。よって、これらの課題のスコアが高かったのは、今回分類した手の動作要素は原因ではないと考えられる。

5. 結言

本研究では、2本のCGの左腕に対する最適な順応課題を調べた。実験では、2本目のCG左手が右手と左右反転する条件と、右手と手首の動きが一致している条件を用意した。そして、順応課題を5つ用意し、それらの課題を行った際に身体所有感と運動主体性が起こるのか調べた。

結果として、2本目のCGの左手の違いは身体所有感と運動主体性に影響を与えなかった。しかし、順応課題による身体所有感と運動主体性への影響はあった。この影響は、難易度が関係しており、手の動作要素が原因ではなかった。

この結果は、身体性転移を目的とした多くの実験において、身体所有感と運動主体性をさらに高めるために効果的だと期待される。

参考文献

- [1] F. Parietti and H. H. Asada. Supernumerary Robotic Limbs for aircraft fuselage assembly: Body stabilization and guidance by bracing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. (2014), pp. 1176-1183. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907002.
- [2] K. Sakurada et al. Investigating the perceptual attribution of a virtual robotic limb synchronizing with hand and foot simultaneously. *Frontiers in Virtual Reality* 4, p. 1210303, (2023). doi: 10.3389/frvir.2023.1210303.
- [3] A. Oyanagi and R. Omura. Transformation to a bird: overcoming the height of fear by inducing the proteus effect of the bird avatar. *Proceedings of 2nd International Confer-*

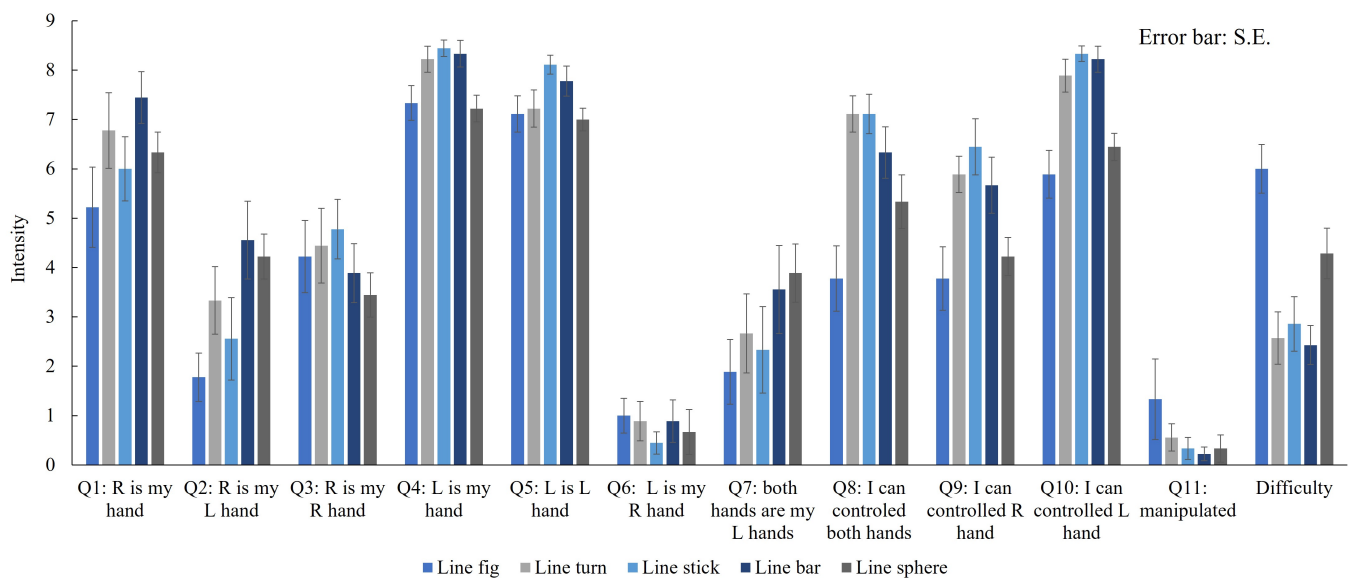


Fig. 3 Means and standard errors of the scores for the questionnaire of line-dance condition.

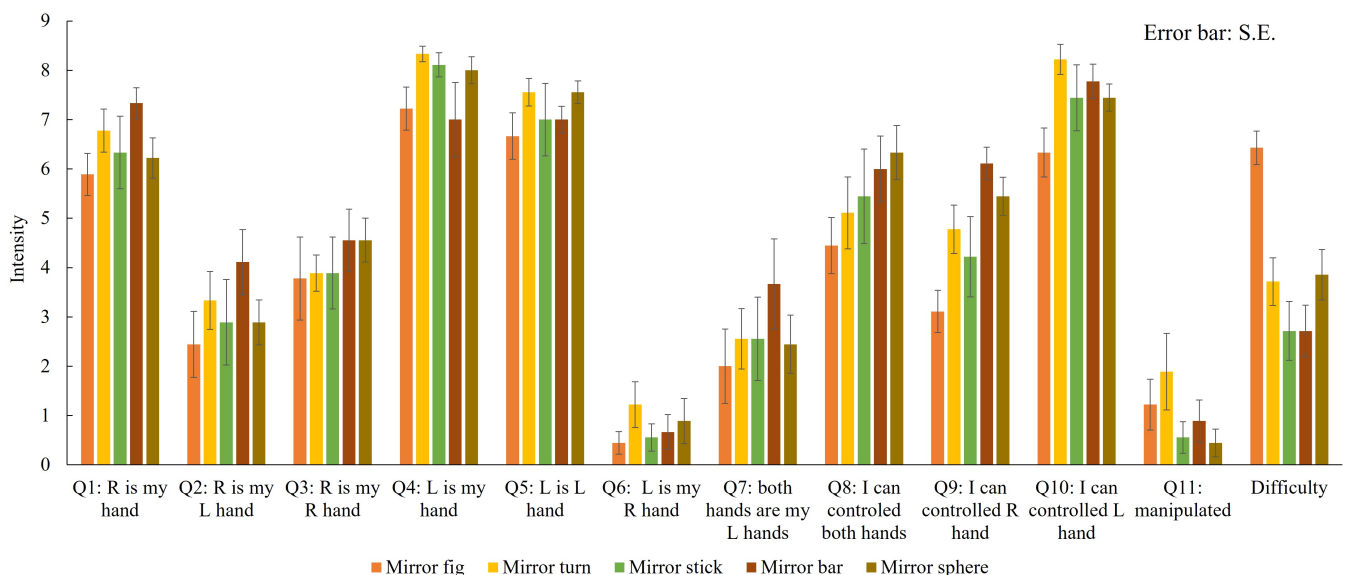


Fig. 4 Means and standard errors of the scores for the questionnaire of mirror condition.

ence on Image and Graphics Processing. (2019), pp. 145–149.

[4] P. Spangenberg, S. M. Geiger, and S. C. Freytag. Becoming nature: Effects of embodying a tree in immersive virtual reality on nature relatedness. *Scientific Reports* 12, p. 1311, (2022).

[5] M. Botvinick and J. Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature* 391, p. 756, (1998).

[6] H. Ehrsson, N. Holmes, and R. Passingham. Touching a Rubber Hand: Feeling of Body Ownership Is Associated with Activity in Multisensory Brain Areas. *Journal of Neuroscience* 25.45, pp. 10564–10573, (2005).

[7] H. Hasegawa et al. Self-Body Recognition through a Mirror: Easing Spatial-Consistency Requirements for Rubber Hand Illusion. *Psych* 2.2, pp. 114–127, (2020). doi: 10.3390/psych2020011.

[8] M. Hara et al. A Novel Rubber Hand Illusion Paradigm Allowing Active Self-Touch With Variable Force Feedback Controlled by a Haptic Device. *IEEE Transaction on Haptics* 46.1, pp. 78–87, (2016).

[9] A. Kawaguchi et al. Asura hands: Own and control two left hands in immersive virtual reality environment. *IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication*. (2023), pp. 1347–1352. doi: 10.1109/RO-MAN57019.2023.10309380.

Table 3 Summary tables of ANOVA for each question item. Corrected p -values are listed (correction factor of 10).

(a) Q1.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	34.2	4	0.0517×10	2.46
Mirror or line dance	0.544	1	0.693×10	0.157
Interaction	2.07	4	0.963×10	0.149
Residuals	277.3	80		

(b) Q2. Hand maneuvered by the right hand was felt as my left hand.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	51.2	4	0.0369×10	2.69
Mirror or line dance	0.544	1	0.736×10	0.114
Interaction	10.8	4	0.685×10	0.570
Residuals	380.4	80		

(c) Q3.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	1.51	4	0.985×10	0.0904
Mirror or line dance	0.0111	1	0.959×10	0.00266
Interaction	13.4	4	0.528×10	0.801
Residuals	334.2	80		

(d) Q4. Hand maneuvered by the left hand was felt as my left hand.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	14.0	4	0.0448×10	2.556
Mirror or line dance	0.711	1	0.474×10	0.518
交互作用	10.6	4	0.112×10	1.94
Residuals	109.8	80		

(e) Q5.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	4.51	4	0.581×10	0.720
Mirror or line dance	1.88	1	0.277×10	1.20
Interaction	9.18	4	0.221×10	1.47
Residuals	125.3	80		

(g) Q7. Both seen hands were felt as my own.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	30.8	4	0.325×10	1.18
Mirror or line dance	1.11	1	0.678×10	0.174
Interaction	8.67	4	0.851×10	0.339
Residuals	510.7	80		

(h) Q8. Control over the two seen hands.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	58.7	4	0.0101×10	3.55
Mirror or line dance	4.90	1	0.280×10	1.19
Interaction	32.6	4	0.107×10	2.49
Residuals	330.7	80		

(i) Q9. Control over the hand maneuvered by the right hand.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	62.18	4	$4.90 \times 10^{-4} \times 10$	5.62
Mirror or line dance	4.90	1	0.187×10	1.771
Interaction	32.4	4	0.0256×10	2.94
Residuals	221.3	80		

(j) Q10. Control over the hand maneuvered by the left hand.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	52.2	4	$4.67 \times 10^{-5} \times 10$	7.29
Mirror or line dance	0.178	1	0.753×10	0.0993
Interaction	10.2	4	0.235×10	1.42
Residuals	143.1	80		

(k) Q.12 Difficulty.

Factor	Sum. squares	df	p -value	F -value
Adaptation task	124.0	4	$2.48 \times 10^{-8} \times 10$	14.5
Mirror or line dance	1.16	1	0.465×10	0.540
Interaction	5.06	4	0.671×10	0.590
Residuals	128.6	80		