

Asura Hands: 3本の左腕への身体性転移

○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: Body-awareness to three left hands

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

Abstract: As one of the body extensions, we prepared a condition in which three CG left hands are manipulated with one left hand in a VR environment, and examined whether body ownership and agency occur. The results of the experiment showed that ownership and agency occurred in three hands, and the same was true even when three hands made different movements.

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⁾。

本研究では、身体拡張の新たな試みとして、3 本の CG の腕を 1 本の左腕で操作する条件下で、CG の腕に対して身体性転移が発生するのか検証した。3 本の内 1 本は実際の左手と空間的に同期させ、他の 2 本は実際の左手よりも左右にずれた位置に配置した。3 本の CG の腕は、いずれも配置が異なるが、VR 操作者の左手と同期して動いた。

もう 1 つの問いは、3 本の CG の腕がやや異なる動きをしている場合にも、身体性が感じられるかどうかである。具体的には、実験では内外側方向に並んで配置された 3 本の腕のうち、内側と外側の腕はそれぞれ内側・外側方向に実際の腕の速度よりも大きい速度で移

動させた。この条件下では、内側に配置された物体へのアクセスには、内側の腕を使用するのがより効率的である。同様に、外側へのアクセスには、外側の腕を使用するのが効率的である。3 本の腕がそれぞれ異なる動作をしていても、それが操縦者に受け入れられるのであれば、身体拡張のためのシステム設計に、示唆を与えることとなる。

上記の問いに答えるため、没入型 VR 環境で 3 本の CG 腕を操作する環境を用意した。操縦者は順応課題と試験課題の後、身体性転移に関するアンケートに回答した。また、3 本の腕の運動主体性を調査するための行動課題も実施した。これまでに 1 本の腕で操作される 3 本腕への身体性転移が調査された報告はなく、本研究は身体拡張の新しい可能性を調査するものである。

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 72 Hz 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 実験刺激

VR 環境で表示される CG 手腕の動きについて、下記の 3 条件を用意した。

1 つ目は、3 本の手腕とも同じ動きをする条件である。この条件では、Fig. 1 のように 3 本の手が表示され

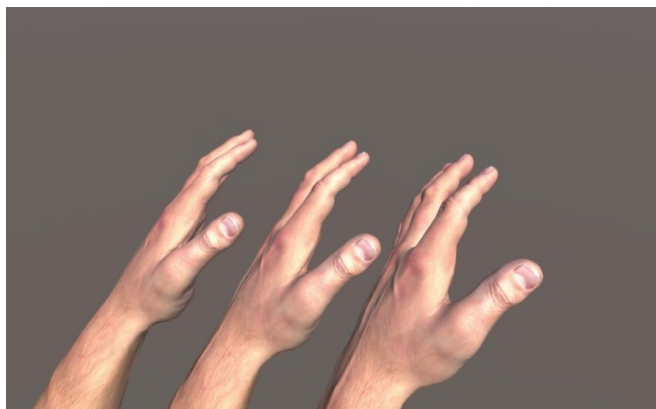


Fig. 1 CG of the three left hands.

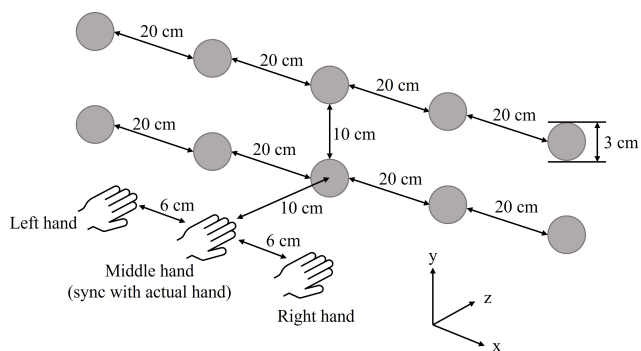


Fig. 2 Loci of spheres and actual and fake hands.

る。中央の手は、実際の左手と同じ位置で同じ動きをした。左右の手は、実際の左手と6 cm ずつ位置がずれていて、同じ動きをした。

2つ目は、3本がそれぞれ違う動きをする条件である。この条件でも3本の手腕が表示され、中央の手は実際の左手と同じ位置で同じ動きをした。右側の手は、体の内側への運動成分のみが1.3倍になった。左側の手は、体の外側への運動成分のみが1.3倍になった。

3つ目は、3本のうち1本のみ動く条件である。この条件では、手腕が3本表示されるものの、左右の手腕は位置が固定され動かなかった。中央の手は、実際の左手と同じ位置で同じ動きをした。この条件では、中央の手腕以外には身体所有感と運動主体性が発生しないと考えられた。

2.4 実験手順

実験を開始すると、ゴーグルに仮想空間と、3本の左手のCGが表示された。まず、参加者は、出現した球に指先で触れるという課題を行った。Fig. 2に示すように、球は実際の手の10 cm前にあるx-y平面上の10個の位置のいずれかにランダムに出現した。その後、Fig. 3のように、参加者は出現した球にできるだけ早く触った。このとき、球に触れるCGの手はどの手でもよかった。球は触れると消え、参加者は手をもとの位置（左肩の前）へ戻した。以上の動作を30回繰り返した。1つの課題の終了後、参加者はゴーグルを外し、2.5節で述べられるアンケートに回答した。参加者は、

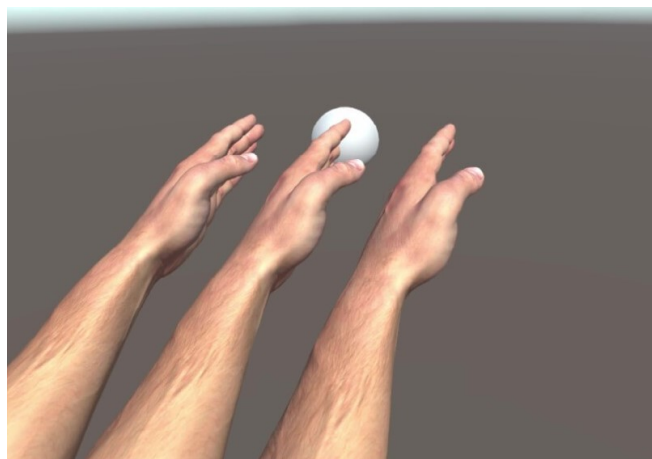


Fig. 3 Task to reach spheres that randomly appear.

3条件の刺激を、ランダムな順でそれぞれ合計2回ずつ体験した。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、課題のインターバルは5分程度であった。

Table 1 Questionnaire items

Q1	自分の左手が3本になったように感じた
Q2	真ん中の手を自分の手のように感じた
Q3	右側の手を自分の手のように感じた
Q4	左側の手を自分の手のように感じた
Q5	3本の手を制御できた
Q6	真ん中の手を制御できた
Q7	右側の手を制御できた
Q8	左側の手を制御できた
Q9	左手が消失したように感じた

2.5 アンケート

Table 1にアンケート項目を示す。Q1-Q4はCGの手腕に対する身体所有感に関する質問であった。Q5-Q8はCGの手腕に対する運動主体性に関する質問であった。Q9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。

参加者は各項目を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「ほんの少しでも感じた」、9を「とても感じた」とした。アンケートに答えた後、参加者は1分間休憩したのち、別の条件で同じ実験を繰り返した。

2.6 データ解析方法

各参加者の同一条件に対する2回のアンケートへの回答は参加者内で平均を計算した。アンケートのスコアは、 t 検定を行い、0との差を調べた。その後、アンケートで回答された得点に対し、二元配置分散分析を適用した。Q9（統制用の質問）は、この解析の対象としなかった。要因は、アンケート項目と速度条件（等倍条件か、1.3倍条件か）とした。

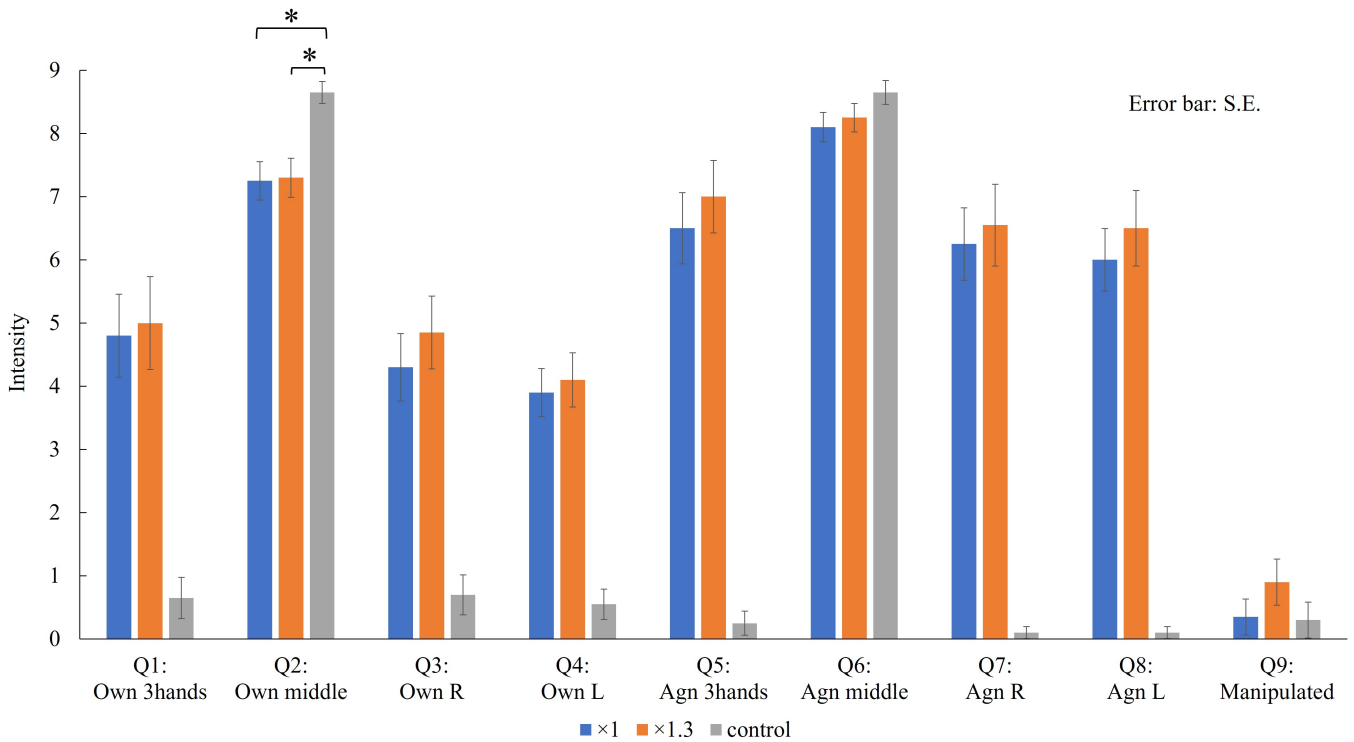


Fig. 4 Means and standard errors of the scores for questionnaires. Blue bins are x1 condition. Orange bins are x1.3 condition. Gray bins are control condition.

また、球が出現してから参加者がそれに触るまでの時間を計測した。そして、球を触れた手腕が3つのうちのいずれであるかを記録した。

Table 2 Result of 2-way ANOVA to compare the 1.0-time and 1.3-time conditions.

Factor	SS	df	F-value	p-value
Question	287.3	7	14.1	8.11×10^{-14}
Conditions	3.75	1	1.28	0.259
Interaction	1.24	7	0.0604	1.000
Residuals	420.6	144		

3. 結果

Fig. 4 にアンケートの結果を示す。すべての項目のスコアは、等倍条件と 1.3 倍条件において、コントロール質問を除いて、0 を有意に超えていた ($p \leq 0.01$)。Q9 の質問に対するスコアは、0 を有意に超えなかった ($p > 0.05$)。

Table 2 に二元配置分散分析の結果を示す。等倍条件と 1.3 倍条件では、アンケートのスコアに有意差はなかった ($F(1, 144) = 1.28, p = 0.259$)。

各アンケート項目に対する事後検定では、Q2 と Q6 を除くすべての項目に対して、統制条件の数値は等倍条件と 1.3 倍条件よりも有意に小さかった。Q2 (中央の手腕への身体所有感) は、コントロール条件がもっとも高かった ($\times 1$ vs. control: $p = 0.00334$, $\times 1.3$ vs.

Table 3 Confusion matrix of $\times 1.0$ condition. Percentages at which each of the three hands were used to reach the ball.

	Hands used to touch the ball		
	Left	Middle	Right
Left	80.6	19.4	0
Middle	0	99.1	0.93
Right	0	22.2	77.8

Table 4 Confusion matrix of $\times 1.3$ condition. Percentages at which each of the three hands were used to reach the ball.

	Hands used to touch the ball		
	Left	Middle	Right
Left	81.0	19.0	0
Middle	0.93	98.1	0.93
Right	0	22.2	77.8

control: $p = 0.00440$)。Q6 (中央の手腕への運動主体性) は、3 条件間で有意な差がなかった。

Fig. 5 に出現した球を触った腕の回数を示す。球の数は、左右の手の近くのほうが、中央の手の近くより多く出現したが、球を取った回数に差はなかった。等倍条件においては、3 本の手腕の使用回数に有意な差はなかった (left vs. middle: $p = 0.0855$; right vs. middle: $p = 0.793$, left vs. right: $p = 0.547$)。1.3 倍条件においても、3 本の手腕の使用回数に有意な差はなかった (left

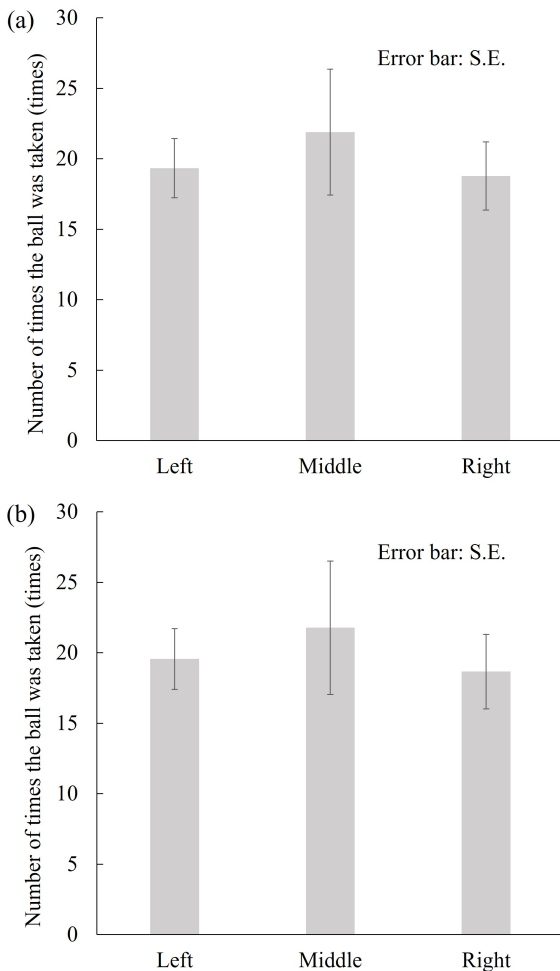


Fig. 5 Means and standard errors of which hand the ball was touched with. (a) When all arms were at constant velocity (1.0-time condition). (b) When the left and right hand accelerate (1.3-time condition).

vs. middle: $p = 0.919$; right vs. middle: $p = 0.817$; left vs. right: $p = 0.347$).

Fig. 6 に球が出現してから触るまでの時間の結果を示す。計測した結果、1.3 倍条件が他の条件より有意に短かった ($\times 1$ vs. $\times 1.3$: $p = 5.79 \times 10^{-8}$, $\times 1.3$ vs. control: $p = 1.50 \times 10^{-8}$).

Table 3 および 4 に球が出現したときに、球を取りに行った手の割合の混同行列を示す。中央の手の近くに出る球が出現したときはほとんどを取りに行ったが、左右の手の近くに出る球が出たときはその限りではなかった。

4. 議論

本研究では、3本のCGの腕を1本の左腕で操作する条件を実装した。実験では、3本とも同期している条件、左右の腕の速さが速い条件、そして2本が動かない条件を用意し実験を行った。

アンケートのスコアは、等倍条件と1.3倍条件においてコントロール質問以外0を有意に超えていた。一方、コントロール条件では、中央の手以外に0を有意に超えてなかった。よって、等倍条件と1.3倍条件において、3本の手に対して身体所有感と運動主体性が

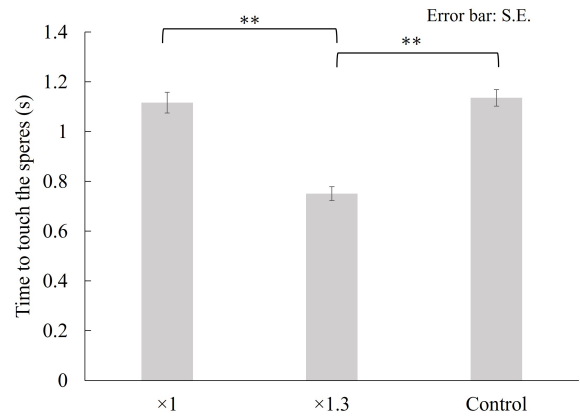


Fig. 6 Means and standard errors of the time between the appearance of the sphere and its being touched.

発生した。

また、3本とも同期している条件も左右の腕の速さが速い条件も身体所有感と運動主体性のスコアは同程度だった。よって、3本のCGの腕がやや異なる動きをしている場合にも、身体性が感じられた。球が出現してから触るまでの時間は1.3倍条件のほうが短かったにも関わらず、これらの2条件に差が生まれなかった理由の一つとして、参加者が速さの違いに気づかなかったことが挙げられる。参加者は、参加者10人のうち8人は実験中に条件の違いに気づかなかった。

身体所有感は、どの条件においても、左右の手より中央の手のほうが強く発生した。また、左右の手の近くに出る球の数のほうが中央の手の近くに出る球の数より多かったが、球を触った回数はずどの手も変わらなかった。さらに、中央の手が最も近くである球に対しては、ほとんど中央の手で取りに行ったものの、左右の手の近くに球が出た場合は、その限りではなかった。中央の手は実際の左手と時空間的に同期しているため、最も身体性転移が強く起きたのではないかと考えられる。

実際の左手と時空間的に同期している手に対する身体所有感は、2本が動かない条件において最も発生した。ほかの2条件と違い時空間的に同期している手のみ強く意識が向き、その手のみを注視しており、身体所有感は視覚の影響が強いため¹⁰⁾、この手のみスコアが非常に高くなったと考えられる。

5. 結言

本研究では、身体拡張の1つとして、VR環境を用いて、3本のCGの腕を1本の左腕で操作する条件を実装した。実験では、3本が実際の左手と同期する条件、3本の内1本は同期し2本は速度が速い条件、そして3本の内2本が動かない条件を用意した。実験では、これらの腕に対して身体性転移が発生するのか検証した。

実験の結果、3本が実際の左手と同期する条件でも3本の内1本は同期し2本は速度が速い条件でも、3本の手に対して身体所有感と運動主体性が同程度に発生し

た。3本のCGの腕がやや異なる動きをしている場合にも、身体性が感じられるということがわかった。速度やCGの手の動きを変えることで結果が変わる可能性があり、さらなる研究が必要である。

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 Conference 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.
- [10] M. S. Antonella Maselli. The building blocks of the full body ownership illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, (2013).