

バーチャル空間における身体分裂時の身体知覚

研究代表者

近藤亮太

東京大学 バーチャルリアリティ教育研究センター 特任助教

1 はじめに

自分の身体はどこまで変えられるだろうか？バーチャルリアリティを用いることで、全く別の人種[1, 22]や性別[15, 23], 年代[2, 24]にすることができる。多くの研究では、観察者の動きに同期して、アバタが動くことで、そのアバタがあたかも自分の身体のように感じる（身体所有感[7, 13]）。このようにVRを用いることで、見た目が自由に変えられることがわかったが、我々の身体はどこまで拡張できるのだろうか。これまでの研究は、複数の身体[8, 16], 第3の腕[3, 4, 9, 21], 第6の指[10, 11, 26]など、様々な身体へ拡張可能であることを示している。

バーチャル身体を左右に分裂した研究では、分裂した身体にも所有感が生起し、自己位置が広がった[12]。分裂した半身位置を自由に操作できるようにした研究では、2地点で左右の半身を独立して操作できる[19]。これは、分裂によって2つの課題を別々の場所で独立して行うといった応用可能性を示している。

このように、分裂によって私達の能力が拡張できる可能性が示唆されているものの、分裂身体の間の空間も自分の身体と感じるかは明らかとなっていない。自分だと感じられる範囲を明らかにすることは、身体拡張のための安全なロボット設計やアバタ設計においても重要である。

2 関連研究

間の空間に対する身体知覚の研究として、透明身体錯覚が挙げられる。Kondo らは、バーチャルな手袋と靴下のみが観察者の運動に連動して動くことで、間の空間に身体所有感が誘発されることを示した[18, 20]。また、その所有感は全身が視覚的に提示されている場合と同程度に強いものだった。一方で、この手足の配置をスクランブルすると、間の空間に対する所有感は消滅する[20]。これは、空間に対する所有感を誘発するには、透明な全身が補完されるようなヒトの身体構造に近い身体部位の配置が重要であることを示唆している。一方で、バーチャルな腕の手首部分のみを消した研究では、消したことによって所有感が低下している[25]。ただし、消した手首をオブジェクトで隠した場合は通常の腕と同様に所有感が生起する。これは、先程のスクランブルした研究と同様に、ない部分が補完され、一つの身体として知覚されるような視覚情報が重要であることを示唆している。このように身体の連続性が失われると、所有感が低下する現象は分裂身体でも生じており、観察者の運動に同期して分裂身体が動くことで、所有感は生起したものの、通常身体よりかは弱くなっている[12]。このように、身体が途切れるような刺激は全体の所有感を低下させるが、どちらの研究でも、間の空間に対する所有感は明らかとなっていない。

そこで本研究では、分裂身体の間の空間を自分の身体として感じているか（身体所有感があるか）調べる。

3 方法

3-1 参加者

実験には34人が参加した。参加者は正常な視力または矯正視力と運動能力を有した。サンプルサイズはG*Power3.1[5, 6]を用いて計算した（対応ありt検定, 効果量 $d_z = 0.5$, $\alpha = 0.05$, power $(1 - \beta) = 0.8$ ）。

3-2 装置

参加者はヘッドマウントディスプレイ（HMD, HTC Vive Pro HMD）を通して、Unityで作成された刺激を観察した。参加者の全身運動をキャプチャするため、左右にはコントローラ（Valve index コントローラ）、腰と左右の足にトラッカ（Tundra tracker）を装着した。バーチャルモーションキャプチャというソフトを用いて全身運動をアバタにリアルタイムに反映し、そのアニメーションを Easy Virtual Motion Capture For Unity を用いてUnityへストリーミングした。

3-3 刺激

実験ではあらかじめ左右に分裂したアバタ（分裂身体）が提示された（図1，左）。分裂身体は参加者の運動に同期または非同期に動いた。非同期の場合は，1s 遅れて参加者の動きが分裂身体に反映された。また，間の空間に脅威が提示された際の参加者の行動変化を計測するため，バーチャルな針山が脅威刺激として提示された（図1，右）。

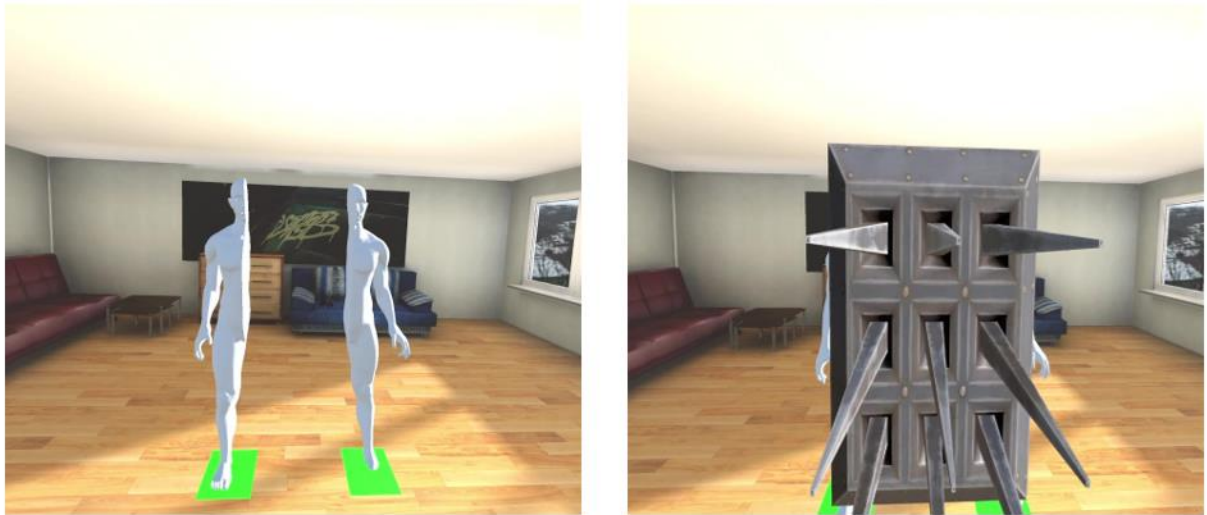


図 1：分裂身体（左），脅威刺激（右）

3-3 手続き

実験では，ヘッドホンから音が鳴ったらできるだけ速く，前方の床にあるタイルを分裂身体の手で踏み，最初の位置に戻ってくるよう教示した（図2）。タイルは分裂身体の手で踏んでいるときは緑，そうでないときは赤色になった。参加者はバーチャル空間で前方の鏡を見ながら動くよう教示された。参加者は，この運動を合計 80 回繰り返した。後半の 40 試行のうち 20 試行は前方に脅威刺激（バーチャルな針山）が提示され，脅威があるときとないとき両方の課題完了時間が記録された。脅威あり試行となし試行の順番はランダムであった。脅威は分裂身体間の空間にのみ刺さる位置に提示された。間の空間に所有感がある場合，刺激への恐怖が強くなり，課題完了時間が長くなると予想した。アバタを使ってもぐらたたきを行った研究では，もぐらたたきのテーブルの周りに針山があると課題遂行時間が長くなった[17]。ただし，こちらの研究では所有感が生じない条件がなかったため，所有感と直接関連性があるとは言えないが，少なくとも所有感がある場合では脅威のあり・なしで課題遂行時間に差が見られた。

80 試行完了後，参加者のつま先位置を記録した。これは，間の空間に所有感がある場合，脅威をさけるために初期位置が徐々に後ろへずれていくことが予想されたためである。Gonzalez-franco et al. [14]においても，上から降りてくる脅威に対する参加者の頭の位置を計測している。つま先位置記録後，アンケートを実施した。アンケート項目は以前の分裂身体研究[12]を参考に作成した。参加者は 5 つの質問に 1（全く当てはまらない） - 7（強く当てはまる）の 7 段階のリッカート尺度で答えた。アンケートの各質問項目はランダム順で提示した。ここまでを 1 ブロックとし，同期条件と非同期条件をそれぞれ 1 ブロックずつ行った（図3）。半数の参加者が同期条件からはじめ，もう半数の参加者は非同期条件から実験を行った。

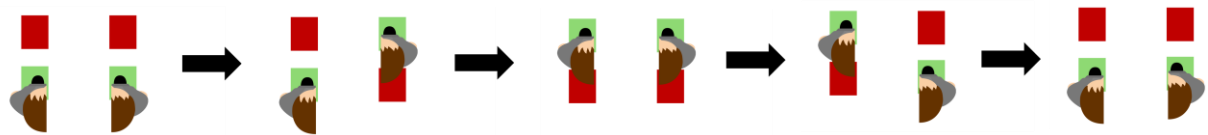
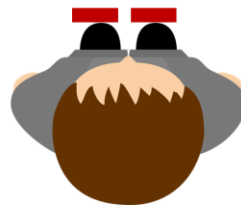
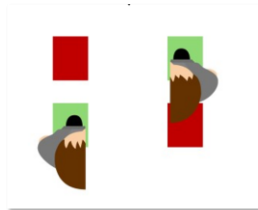


図 2：タイルを踏む課題

タイルを踏む
80 試行

つま先位置の記録



アンケート

図 3：実験の流れ

4 結果

4-1 アンケート

各質問に対して、同期と非同期の2条件で対応あり t 検定を行った。その結果、分裂した間の空間に対する所有感は同期と非同期で差が見られなかった（図 4, $p = .33$ ）。分裂した身体の所有感は同期のほうが非同期よりも強くなった（ $p = .003$ ）。Q3 では、同期のほうが非同期よりも分裂身体の運動が自分の運動のように感じられる（行為主体感 [7]）ことがわかった（ $p = .024$ ）。Q4, Q5 のコントロール質問では、どちらも条件間の有意差は見られなかった（Q4: $p = .25$; Q5: $p = 1.00$ ）。

4-2 課題完了時間

参加者が分裂身体で前方のパネルを踏み、初期位置のパネルに戻ってくるまでの時間を課題完了時間として記録した。非同期条件ではアバタが 1 s 遅れて動いたため、非同期の課題完了時間は 1 s 引いたものを解析に使用した。運動条件（同期・非同期） $\times$ 脅威刺激（あり・なし）で分散分析を行った。その結果、運動条件では、同期のほうが非同期よりも課題完了時間が早く、主効果が見られた（図 5, $p < .001$ ）。脅威刺激の主効果（ $p = .50$ ）および交互作用は見られなかった（ $p = .86$ ）。

4-3 つま先位置

左右のつま先位置それぞれに対して、同期と非同期の2条件で対応あり t 検定を行った。その結果、左右どちらのつま先位置においても、条件間で有意差は見られなかった（図 6）。

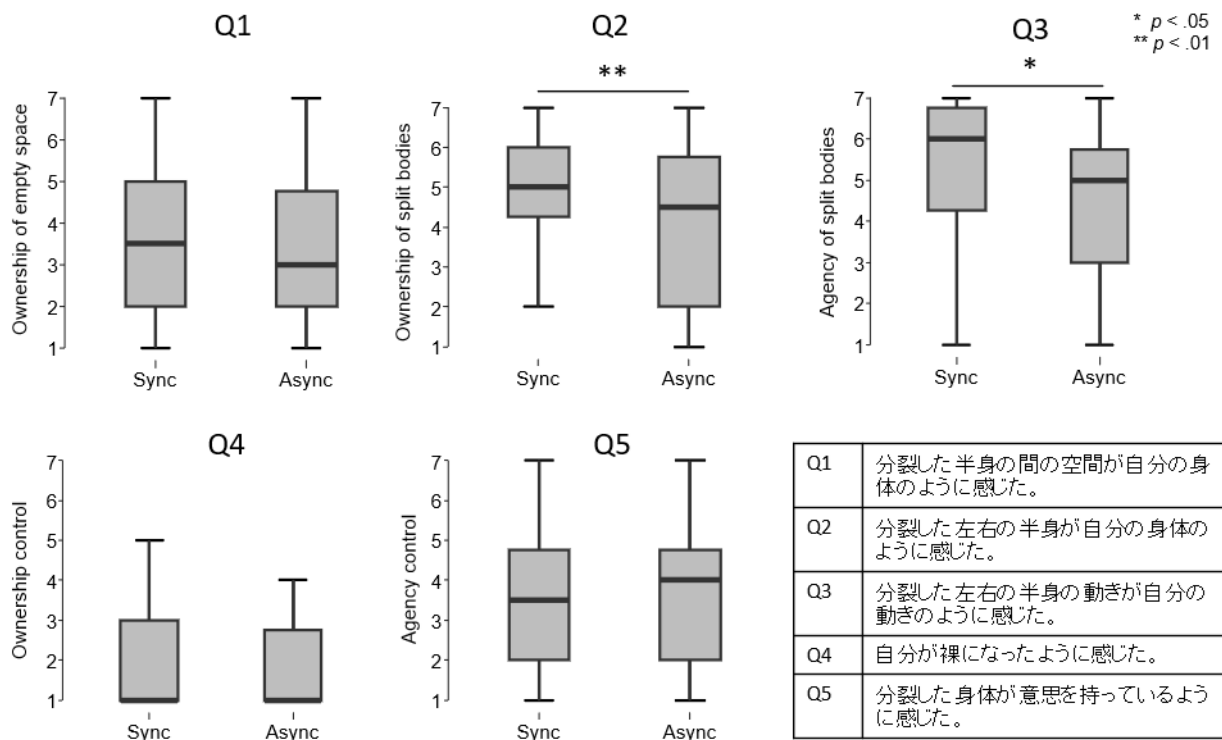


図 4 : アンケート結果

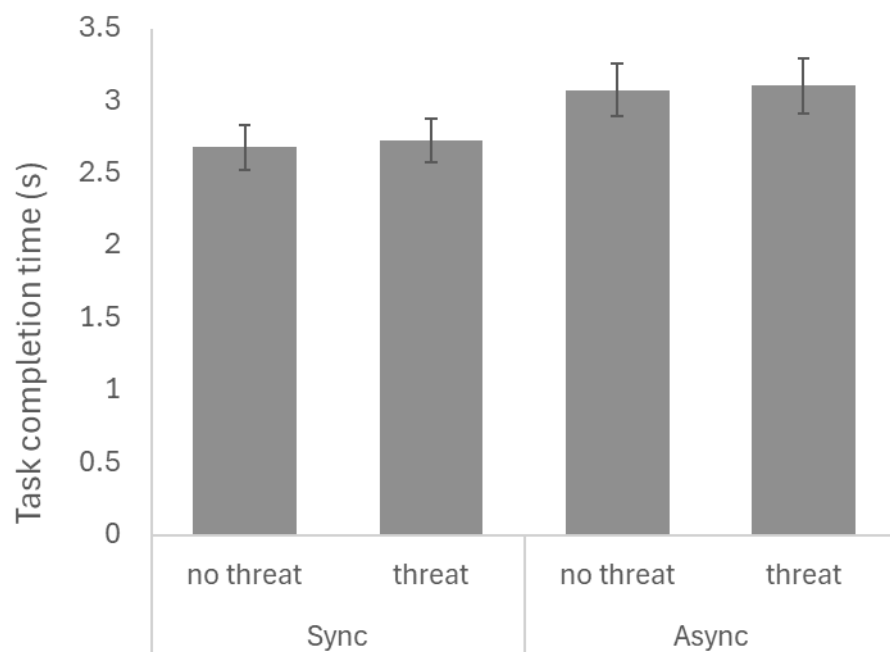


図 5 : 課題完了時間

front

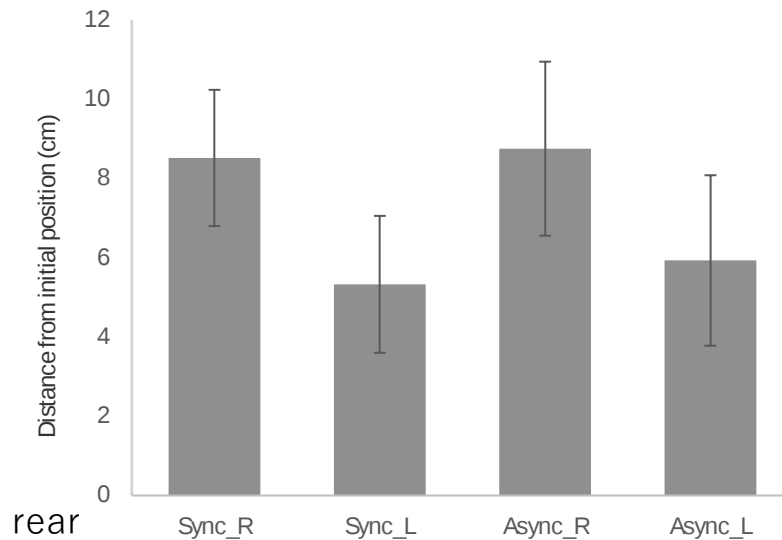


図 6：初期位置からの移動量

4 考察

本研究では、分裂身体の間の空間に身体所有感が生じるか調べた。主観評定では、間の空間の所有感の質問で、スコアが中央値の4より低く、同期非同同期間に有意差も見られなかった。また、課題完了時間では、脅威のあり・なしで差が見られず、課題終了後の足の位置においても同期非同同期間で差はなかった。これらの結果から、間の空間に対する所有感は生起していないことが示された。

一方で、分裂した身体そのものに対する所有感は、同期のほうが非同同期よりも強くなり、行為主体感においても同様の結果となった。そのため、身体分裂時、間の空間には所有感は生起しないが、分裂した半身に対する所有感及び行為主体感は生起することがわかった。

課題完了時間では、脅威のあり・なしで差がなかったが、同期・非同同期間には有意差が見られ、同期のほうが完了時間が早かった。これは、アバタが遅れて動く非同同期のほうが単純にパネルを踏む課題が難しかったことが原因だろう。身体所有感を調べる研究では、身体所有感の生じないコントロール条件として非同同期条件が用いられるが、課題が難しくなるため、他の方法を用いるべきかもしれない。

透明身体[18, 20]においては、間の空間に所有感が生起したが、本研究では生起しなかった。理由としては、刺激の補完可能性が挙げられる。透明身体の手袋と靴下は、本来人の腕や足がそこにあるべきであるが、ない状態のため、間の身体が補完されやすいのかもしれない。一方で、分裂身体は視覚情報としては全身が描画されており、間の空間に身体が補完されづらいことが原因かもしれない。このように身体の補完可能性が高いほど、そこに自分の身体を感じやすいことが予想される。

【参考文献】

- [1] Domna Banakou, Parasuram D. Hanumanthu, and Mel Slater. 2016. Virtual Embodiment of White People in a Black Virtual Body Leads to a Sustained Reduction in Their Implicit Racial Bias. *Frontiers in Human Neuroscience* 10 (nov 2016). doi:10.3389/fnhum.2016.00601
- [2] Mel Slater Domna Banakou, Raphaela Groten. 2013. Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 31 (Jul 2013), 12846-12851. doi:10.1073/pnas.1306779110
- [3] H Henrik Ehrsson. 2009. How many arms make a pair? Perceptual illusion of having an additional limb. *Perception* 38, 2 (2009), 310-312.
- [4] Chenggui Fan, Sara Coppi, and H Henrik Ehrsson. 2021. The supernumerary rubber hand illusion revisited: Perceived duplication of limbs and visuotactile events. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 47, 6 (2021), 810.
- [5] Axel Buchner Albert-Georg Lang Franz Faul, Edgar Erdfelder. 2009. Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods* 41, 4 (Nov 2009), 1149-1160. doi:10.3758/brm.41.4.1149
- [6] Albert-Georg Lang-Axel Buchner Franz Faul, Edgar Erdfelder. 2007. G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods* 39, 2 (May 2007), 175-191. doi:10.3758/bf03193146
- [7] Shaun Gallagher. 2000. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences* 4, 1 (Jan 2000), 14-21. doi:10.1016/s1364-6613(99)01417-5
- [8] Arvid Guterstam, Dennis E. O. Larsson, Joanna Szczotka, and H. Henrik Ehrsson. 2020. Duplication of the bodily self: a perceptual illusion of dual full-body ownership and dual self-location. *Royal Society Open Science* 7, 12 (dec 2020), 201911. doi:10.1098/rsos.201911
- [9] Arvid Guterstam, Valeria I. Petkova, and H. Henrik Ehrsson. 2011. The Illusion of Owning a Third Arm. *PLoS ONE* 6, 2 (feb 2011), e17208. doi:10.1371/journal.pone.0017208
- [10] Ludovic Hoyet, Ferran Argelaguet, Corentin Nicole, and Anatole LAccuyer. 2016. Wow! I Have Six Fingers!: Would You Accept Structural Changes of Your Hand in VR? *Frontiers in Robotics and AI* 3 (may 2016). doi:10.3389/frobt.2016.00027
- [11] Paulina Kieliba, Danielle Clode, Roni O. Maimon-Mor, and Tamar R. Makin. 2021. Robotic hand augmentation drives changes in neural body representation. *Science Robotics* 6, 54 (may 2021). doi:10.1126/scirobotics.abd7935
- [12] Ryota Kondo and Maki Sugimoto. 2022. Split body: Extending self-location by splitting a body left and right. *Frontiers in Virtual Reality* 3 (oct 2022). doi:10.3389/frvir.2022.992803
- [13] Konrad P. Kording-Mel Slater Konstantina Kilteni, Antonella Maselli. 2015. Over my fake body: body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Frontiers in Human Neuroscience* 9 (Mar 2015). doi:10.3389/fnhum.2015.00141
- [14] Bernhard Spanlang Mel Slater Mar Gonzalez-Franco, Daniel Perez-Marcos. 2010. The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment. 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR) (Mar 2010), 111-114. doi:10.1109/vr.2010.5444805
- [15] Maria V. Sanchez-Vives Olaf Blanke Mel Slater, Bernhard Spanlang. 2010. First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. *PLoS ONE* 5, 5 (May 2010), e10564. doi:10.1371/journal.pone.0010564
- [16] Reiji Miura, Shunichi Kasahara, Michiteru Kitazaki, Adrien Verhulst, Masahiko Inami, and Maki Sugimoto. 2022. MultiSoma: Motor and Gaze Analysis on Distributed Embodiment With Synchronized Behavior and Perception. *Frontiers in Computer Science* 4 (may 2022). doi:10.3389/fcomp.2022.788014

- [17] Ludovic Hoyet Anatole Lecuyer Rebecca Fribourg, Ferran Argelaguet. 2018. Studying the Sense of Embodiment in VR Shared Experiences. 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) (Mar 2018), 273-280. doi:10.1109/vr.2018.8448293
- [18] Kouta Minamizawa Takayuki Hoshi Masahiko Inami Michiteru Kitazaki Ryota Kondo, Maki Sugimoto. 2018. Illusory body ownership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity. Scientific Reports 8, 1 (May 2018). doi:10.1038/s41598-018-25951-2
- [19] Maki Sugimoto Ryota Kondo. 2023. Dynamic Split Body: Changing Body Perception and Self-Location by Manipulating Half-Body Position. SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies (Nov 2023), 1-2. doi:10.1145/3610541.3614588
- [20] Maki Sugimoto Masahiko Inami Michiteru Kitazaki Ryota Kondo, Yamato Tani. 2020. Scrambled body differentiates body part ownership from the full body illusion. Scientific Reports 10, 1 (Mar 2020). doi:10.1038/s41598-020-62121-9
- [21] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. 2017. MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism. In ACM SIGGRAPH 2017 emerging technologies. 1-2.
- [22] Salvatore M. Aglioti Mel Slater Tabitha C. Peck, Sofia Seinfeld. 2013. Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. Consciousness and Cognition 22, 3 (Sep 2013), 779-787. doi:10.1016/j.concog.2013.04.016
- [23] Pawel Tacikowski, Jens Fust, and H. Henrik Ehrsson. 2020. Fluidity of gender identity induced by illusory body-sex change. Scientific Reports 10, 1 (sep 2020). doi:10.1038/s41598-020-71467-z
- [24] Ana Tajadura-JimAcnez, Domna Banakou, Nadia Bianchi-Berthouze, and Mel Slater. 2017. Embodiment in a Child-Like Talking Virtual Body Influences Object Size Perception, Self-Identification, and Subsequent Real Speaking. Scientific Reports 7, 1 (aug 2017). doi:10.1038/s41598-017-09497-3
- [25] Gaetano Tieri, Emmanuele Tidoni, Enea Francesco Pavone, and Salvatore Maria Aglioti. 2015. Mere observation of body discontinuity affects perceived ownership and vicarious agency over a virtual hand. Experimental brain research 233 (2015), 1247-1259.
- [26] Kohei Umezawa, Yuta Suzuki, Gowrishankar Ganesh, and Yoichi Miyawaki. 2022. Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study. Scientific Reports 12, 1 (feb 2022). doi:10.1038/s41598-022-06040-x

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Illusory Body Ownership of Empty Space between Split Bodies	Augmented Humans 2025	2025 年 3 月