



自律動作する義手の運動時間が 身体性に及ぼす効果

Effect of motion time of an autonomous prosthetic arm on embodiment

Hapuarachchi Harin¹⁾, 井上康之²⁾, 北崎充晃¹⁾

Harin Hapuarachchi, Yasuyuki Inoue, 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, harinmanujaya@gmail.com, mich@tut.jp)

2) 富山県立大学 工学部 情報システム工学科

(〒939-0398 富山県射水市黒河 5180, inoue.yasuyuki@pu-toyama.ac.jp)

概要：バーチャル空間内で躍度最小軌道で自律的に動作する義手を参加者に体験させ、義手に対する身体性を計測した。被験者内実験計画で運動時間 0.125 秒, 0.250 秒, 0.5 秒, 1 秒, 2 秒, 4 秒の 6 条件で動作する義手を使い、参加者はリーチングタスクを行った。その結果、運動時間が 1 秒の条件で身体所有感、行為主体感が一番高くなり、義手の動きの速さによって身体所有感も行為主体感も似たようなパターンで変わることが明らかになった。

キーワード：身体所有感、行為主体感、身体性、義手

1. はじめに

視覚と触覚の統合や視覚と身体運動の同期性を利用して、人以外の物体やバーチャルアバター、ロボットなどに対して身体所有感錯覚を誘発することができる[1,2]。バーチャルリアリティを用いると他人が操作する自分のアバターの腕に対する身体性を調べることもでき、勝手に動く腕の目的を知ることや、腕の動きと同期した触覚刺激を体に与えることによって自分が操作できない腕にも身体性のある程度誘発することができる[3,4]。

ロボットの動きの速さによってロボットへの印象は変るという研究も報告されている[5]が、ロボットが自分の身体の一部、つまり義手の場合はそのロボット義手の動きの速さは身体性にどう影響するかは研究されていない。

バーチャル空間内で自律動作をする義手に対する身体所有感と行為主体感がその義手の運動時間（つまり動きの速さ）によってどう変わるかを解明することを本実験の目的とした。

2. 方法

2.1 参加者

実験の目的を知らない 19 人の被験者が実験に参加した。本実験は、豊橋技術科学大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認を得て、その規則に基づいて実施された。全

ての被験者実験同意書を理解・合意し、署名したのちに実験に参加した。

2.2 装置

被験者の全身の動きはモーションキャプチャシステム（Vicon Bonita10, カメラ 12 台, 1024×1027 ピクセル, 250fps）により計測された。被験者のヘッドマウントディスプレイ（HMD：Varjo Aero, 片眼 2880×2720 ピクセル, 73×102 deg, 90 Hz refresh rate）に対応したバーチャル空間とアバターを提示した。バーチャル環境および実験課題は、Unity（2021.3.8f1）を用いて作成した。本実験の参加者は健常人であったため、ロボット義手の印象に被験者自身の腕の動きが関与しないように腕を曲げられないようにする固定器具を利用した。

2.3 刺激と条件

実験は義手の運動時間 (d) が 0.125 秒, 0.250 秒, 0.5 秒, 1 秒, 2 秒, 4 秒になる 6 条件から構成された。被験者は、一人称視点から図 1 のような左腕の肘に義手が付けられたアバターを観察し、義手を使いリーチングタスクを行った。各条件で、被験者がアバターの左腕の肘をターゲットの方に動かしたとき、肘とターゲットの間の距離が肘と義手の中指先の間距離より小さくなった瞬間に式 (3) で角度を計算されて義手が動き始めた。先行研究[6]を参考に式 (1) から指先の動きが躍度最小に動くように各

フレームに義手が曲がる角度を式(3)によって計算された。義手は人間の肘と同様に一つの軸の周りにしか曲げられないようにした。ターゲットは半径5cmの球体であり、義手の中指先でリーチングされた1秒後に消えた。ターゲットが消えたら義手が同じ運動時間で元の位置まで自律に躍度最小の動きで延ばされた。

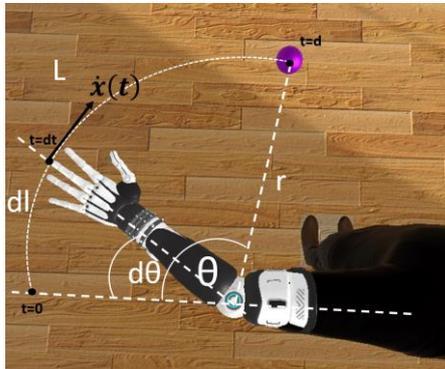


図1: 自律動作するバーチャル義手

図2のように義手の肘から曲がる機能を使わずに伸ばしたままリーチングできなくするために被験者の前にポールを立てた(バーチャル空間に一致した位置に実空間にも実際にポールを立てた)。ターゲットが毎回図2に示す領域内のランダムな位置に出現した。

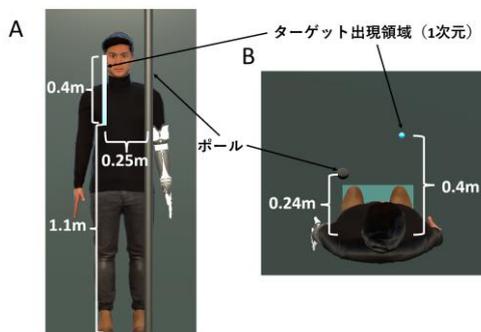


図2: アバターとターゲット出現領域

$$x(t) = x_i + (x_f - x_i) \left\{ 10 \left(\frac{t}{d} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{d} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{d} \right)^5 \right\} \quad (1)$$

$x(t)$: 指先の位置

x_i : 指先の初期位置

x_f : ターゲットの位置

t : 運動始めてから立った時間

d : x_i から x_f までの運動時間(実験の独立変数)

$\dot{x}(t)$: 速度

$$\dot{x}(t) = \frac{30(x_f - x_i)t^2}{d^3} \left(1 - \frac{2t}{d} + \frac{t^2}{d^2} \right) \quad (2)$$

式(2)を用いて式(3)のように1フレーム当たり義手が肘から曲がる角度の $d\theta$ を計算し、躍度最小限で義手が自動でターゲットの方に動かした。

$$d\theta = 180 k \cdot \frac{30r\theta t^2}{d^3} \left(1 - \frac{2t}{d} + \frac{t^2}{d^2} \right) / \pi r \quad (3)$$

$d\theta$: 1フレーム当たり義手が肘から曲がる角度

k : フレーム間の時間(本実験では0.02秒になる)

r : 義手の肘から指先までの長さ

θ : ターゲットまでの角度

図3は、式(1)、(2)、(3)で計算される指先の位置、指先の加速度、とフレーム当たり義手が肘から曲がる角度をグラフにしたもので、義手の指先が1秒で30cm動く例を示している。

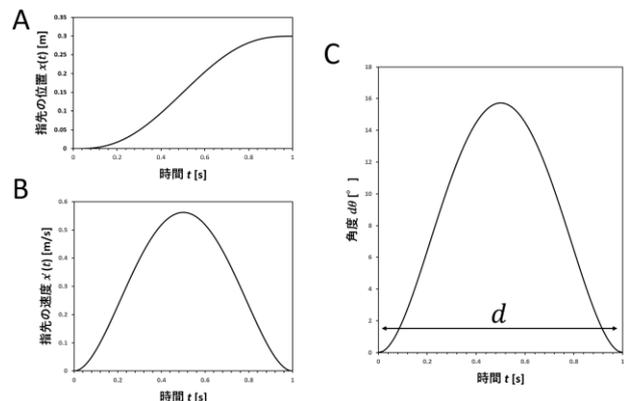


図3: 義手の運動時間 d が1秒で指先が0.3m動く場合の(A)指先の位置、(B)指先の速度と(C)1フレーム当たり義手が肘から曲がる角度の時間との変化

2.4 手続き

被験者はモーションキャプチャスーツとHMDと左腕の固定器具を装着し、バーチャル義手を使い、1セッションに15回リーチングを行った。セッションの最後に被験者が義手に対する身体所有感と行為主体感に関するアンケートに回答した。合計でそのようなセッションを12回(速度6条件x繰り返し2回)ランダム順に行った。

3. 結果

3.1 身体所有感

図4は身体所有感と運動時間の関係を表している。フリードマン検定により、義手への身体所有感は運動時間によって有意に変化することが明らかになった($\chi^2(5) = 22.634$, $p < .001$, $W = .238$)。表1がConover検定を用いた対照比較をした結果である。

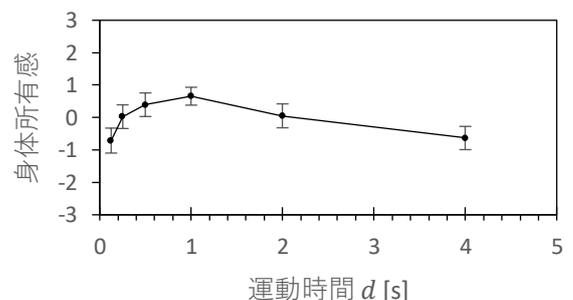


図4: 義手への身体所有感

表 1 : 身体所有感の Conover 検定の結果

		T-Stat	df	W _i	W _j	p
0.125 s	0.25 s	2.574	90	45.500	74.000	0.012
	0.5 s	3.071	90	45.500	79.500	0.003
	1 s	3.523	90	45.500	84.500	< .001
	2 s	2.032	90	45.500	68.000	0.045
0.25 s	0.5 s	0.181	90	45.500	47.500	0.857
	1 s	0.497	90	74.000	79.500	0.621
	2 s	0.948	90	74.000	84.500	0.345
	4 s	0.542	90	74.000	68.000	0.589
0.5 s	1 s	2.394	90	74.000	47.500	0.019
	2 s	0.452	90	79.500	84.500	0.653
	4 s	1.039	90	79.500	68.000	0.302
	2 s	2.891	90	79.500	47.500	0.005
1 s	2 s	1.490	90	84.500	68.000	0.140
	4 s	3.342	90	84.500	47.500	0.001
2 s	4 s	1.852	90	68.000	47.500	0.067

3.2 行為主体感

図 5 は行為主体感と運動時間の関係を表している。フリードマン検定により、義手への行為主体感は運動時間によって有意に変化することが明らかになった ($\chi^2(5) = 26.876$, $p < .001$, $W = .283$)。表 2 が Conover 検定を用いた対照比較をした結果を表すものである。

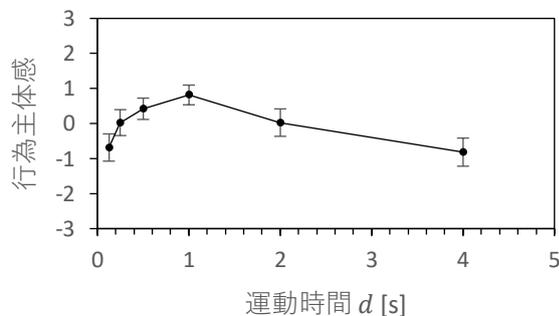


図 5 : 義手への行為主体感

表 2 : 行為主体感 Conover 検定の結果

		T-Stat	df	W _i	W _j	p
0.125 s	0.25 s	1.683	90	49.000	68.000	0.096
	0.5 s	2.746	90	49.000	80.000	0.007
	1 s	3.765	90	49.000	91.500	< .001
	2 s	1.639	90	49.000	67.500	0.105
0.25 s	0.5 s	0.532	90	49.000	43.000	0.596
	1 s	1.063	90	68.000	80.000	0.291
	2 s	2.082	90	68.000	91.500	0.040
	4 s	0.044	90	68.000	67.500	0.965
0.5 s	1 s	2.215	90	68.000	43.000	0.029
	2 s	1.019	90	80.000	91.500	0.311
	4 s	1.107	90	80.000	67.500	0.271
	2 s	3.278	90	80.000	43.000	0.001
1 s	2 s	2.126	90	91.500	67.500	0.036
	4 s	4.297	90	91.500	43.000	< .001
2 s	4 s	2.171	90	67.500	43.000	0.033

4. 考察

義手の運動時間が変わると義手に対する身体性がどう変わるかを調べた結果、身体所有感も行為主体感も似たようなパターンで変化し、運動時間が 0.5 秒や 1 秒の場合は

最も高くなり、運動時間がそれより大きくなっても小さくなくても徐々に身体性が下がることがわかった。義手の動きの速さが早すぎる (125ms で動く条件) のも遅すぎるのも (4 秒で動く条件) 身体性を減らす原因となるため、義手開発などで動作速さを最適化することにより利用者の義手への身体性を上げることができると考えられる。

RoSAS (Robot Social Attribute Scale) [7] などを使って義手への感情なども測定し、義手の動きの速さとどのような関係があるかを調べるのを今後の課題にする。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (JP20H04489; JP22H04774; JP22KK0158)、JST 科学イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 (JPMJFS2121) および国立大学改革・研究基盤強化推進補助金 (202334Z302) の補助を受けて行われた。

参考文献

- [1] M. Botvinick, J. Cohen. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756-756, 1998.
- [2] K. Kilteni, R. Groten, M. Slater. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373-387, 2012.
- [3] H. Hapuarachchi, M. Kitazaki. Knowing the intention behind limb movements of a partner increases embodiment towards the limb of joint avatar. *Scientific Reports*, 12(1), 11453, 2022.
- [4] H. Hapuarachchi, T. Hagiwara, G. Ganesh, M. Kitazaki. Effect of connection induced upper body movements on embodiment towards a limb controlled by another during virtual co-embodiment. *PLoS One*, 18(1), e0278022, 2023.
- [5] M. K. Pan, E. Knoop, M. Bäcker, G. Niemeyer. Fast handovers with a robot character: Small sensorimotor delays improve perceived qualities. In *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 6735-6741). IEEE, 2019.
- [6] T. Flash, N. Hogan. The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *Journal of neuroscience*, 5(7), 1688-1703, 1985.
- [7] C. M. Carpinella, A. B. Wyman, M.A. Perez, S. J. Stroessner. The robotic social attributes scale (RoSAS) development and validation. In *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on human-robot interaction* (pp. 254-262), 2017.