



# 行為主体感保持のための ユーザ運動同期を用いた追加肢操作システム

山口周<sup>1)</sup>, 橋本健<sup>2)</sup>, 峯大典<sup>1)</sup>, 谷川智洋<sup>1)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, { yamaama, mine, tani, narumi } @cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) ソニーコンピュータサイエンス研究所 (〒 141-0022 東京都品川区東五反田 3-14-13 高輪ミュージズビル, hashimoto@csl.sony.co.jp)

**概要:** 生来の身体に無い肢体をユーザに付加する追加肢は身体の補助・拡張手法として期待されているが、行為主体感を伴った全身操作には相応の身体的・認知的負荷を要するという課題があった。本研究では、ユーザの手の運動に同期して動作生成 AI が追加肢の運動を実行する半自律制御手法を提案する。腕を同時に複数本動かしてタスクを行っているようユーザに感じさせることで、行為主体感保持と操作負荷軽減の両立を図る。

**キーワード:** 追加肢, 半自動操作, 行為主体感, 運動同期,

## 1. 序論

バーチャルリアリティ (VR) やロボティクス技術によって実現される身体拡張は、人間の認知能力や身体能力を拡大する手法として期待されている。特に、生来の身体には備わっていない肢体をユーザに付加する追加肢は、マルチタスク [1] や高速なタスク遂行 [2] を実現する有力な身体拡張手法である。追加肢の操作手法は、ユーザの余剰自由度を利用する手法 [1, 2, 3, 4] と、第 2 のユーザや動作生成 AI 等の外部エージェントに制御を委譲する手法 [5, 6, 7] の 2 種類に大別される。前者の手法は、追加肢の運動を自分が引き起こしたとする感覚である行為主体感が生じやすく、意図通りに操作しやすい一方で、生来の身体と同時に追加肢を操作するための認知的・身体的負荷を要する。後者は、ユーザの認知的・身体的負荷をあまり必要としない一方で、追加肢の運動に対するユーザの行為主体感が生じにくく、ユーザが意図通りに操作することが困難である。

この身体的・認知的負荷と身体化感覚の間にあるトレードオフに対し、我々は「追加肢の自律動作パラメータの一部をユーザの運動と同期させることで、追加肢の運動に対するユーザの行為主体感が向上する」という仮説を立て、半自律制御システム「SyncLimbs」を提案する (図 1)。この仮説は、他者との同期運動によって他者の運動に対し行為主体感が生起するとした先行研究 [8] に立脚している。SyncLimbs においてユーザの手と追加肢はそれぞれ別のタスクを遂行するが、追加肢は自身のタスクの進捗の度合いがユーザのタスクと一致するような運動を生成する。これによりユーザは追加肢の運動の予測が容易になり、行為主体感が生起すると考えた。

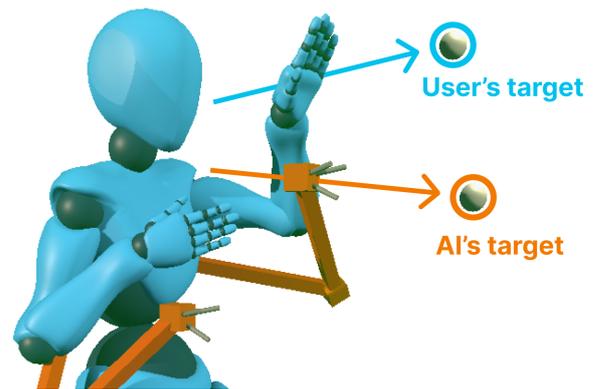


図 1: SyncLimbs の模式図。バーチャル空間上のアバタ (青) に追加肢 (橙) が 2 本接続されており、追加肢は動作生成 AI が操作する。

## 2. 関連研究

### 2.1 追加肢

追加肢は、ウェアラブルロボットとしてユーザの身体に装着したり、バーチャル空間上のアバタに肢体を追加することで実現される。追加肢は腕や足、指等様々な形態で実装されるが、本研究では上肢に取り付けて腕として使用する追加肢を対象とする。

追加肢の操作方法は、ユーザの余剰自由度を割り当てる方式と、第 2 のユーザや動作生成 AI 等の外部エージェントに委譲する方式の 2 種類に大別される。前者の方式では、余剰自由度として頭部 [2] や足 [4]、上肢 [3] の動作や神経信号 [1] を用いた例が報告されており、行為主体感を維持しながらタスクの成績を向上させたり [2]、複数のタスクを同時に実行したりすることが可能である [1]。一方で、この方式では自身の元来の肢体と同時に追加肢を操作する必要がある、相応の認知的・身体的負荷を要する。

後者には、第2のユーザが追加肢を遠隔で操作する手法 [5] が知られる他、動作生成 AI を用いてユーザの姿勢維持支援 [6] や頭上作業支援 [7] を行う研究が報告されている。この方式ではユーザが追加肢の操作に直接関与しないため認知的・身体的負荷は低い一方で、行為主体感が生じしない課題がある。

## 2.2 同期運動による行為主体感の生起

行為主体感とは、ある行為を行ったのが自分であると感じる感覚であり、VR アバタや追加肢を含むバーチャルな身体を操作する際の自律性や責任感に関連する重要な指標である [9]。行為主体感は、これまでの研究から、自身の意図と自身の運動によって引き起こされた結果とが一致した場合に生起することが知られている。したがって、自身以外が引き起こした運動であっても、自身の運動と同時に引き起こされた運動に対して行為主体感が生起する可能性がある。実際、他者が自身と同一内容の運動を同時に行った場合、他者の腕の運動に対して行為主体感が生起したことが報告されている [8]。これらの知見から、追加肢が自律制御された状態でも、運動の代表的なタイミングがユーザの腕の運動と一致していれば、追加肢に対するユーザの行為主体感が向上する可能性がある。

ただし、これまでの研究は他者が同一内容の運動を行っている状況を想定している一方で、追加肢はマルチタスクや高速なタスク遂行を実現するために元来の肢体とは異なる内容の運動を行うことが多い。従来の研究では運動のタイミングと内容とが一致した場合の行為主体感のみが検討されており、異なる内容の運動を行う場合の行為主体感の生起については十分に検証されていない。

## 3. 提案手法

本章では、追加肢の運動をユーザの運動と同期させる半自律制御システム「SyncLimbs」について説明する。SyncLimbs は、ユーザと追加肢が個別にタスクを実行する系において、ユーザ側のタスク進捗率と追加肢側のタスク進捗率が一致するように追加肢の運動を調整することで、ユーザと追加肢の運動を同期させる。SyncLimbs は図2に表されるように、タスクとそれを実行するユーザハンドと AI ハンドから構成される。ユーザハンドおよび AI ハンドはアバタの手の数だけ存在する。ユーザハンドは、バーチャル空間上のアバタの元来の手に対応し、ユーザが持つコントローラと位置が一致するよう動作する。一方、AI ハンドは追加肢に対応し、タスクを実行するために並進・回転やオブジェクトの把持を行う能力を有する。アバタの頭部、元来の手先、追加肢の手先以外の身体部位の動作は、逆運動学によって生成される。

本研究におけるタスクは、特定の位置への移動や回転、オブジェクトの把持等の単一の行為を指す。タスクは、開始時の状態を 0、終了時の状態を 1 とする進捗率がユーザハンドおよび AI ハンドとの間に定義される。例えば、特定の位置に移動するタスクの場合、ユーザハンドおよび AI ハンド

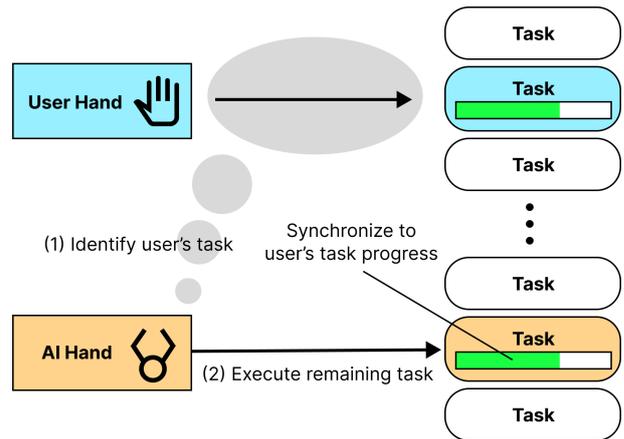


図2: SyncLimbs を構成するユーザハンド、AI ハンドとタスク。(1) ユーザハンドが行っているタスクを AI ハンドが識別する。(2) 残りのタスクの中から AI ハンドが自身のタスクを識別する。その後、AI ハンドは進捗率がユーザハンドのタスクと一致するよう運動する。

が初期位置にある場合の進捗率を 0、特定の位置にある場合の進捗率を 1 とし、両者の中間にある場合は両者との距離に応じて 0 から 1 の値を取る。

AI ハンドは、以下の手順でユーザハンドが行っているタスクと自身が行うべきタスクを識別し、それぞれのタスクの進捗率が一致するよう移動・回転等の運動を実行する。運動手法はタスクごとに実装されており、AI ハンドは自身のタスクが変更された際に運動手法を切り替えることで、様々なタスクに対応できる。まず、AI ハンドは、バーチャル空間上にある全てのタスクの中から、ユーザハンドについての進捗率が最も高いタスクを求め、これをユーザハンドのタスクとして識別する。その後、残りのタスクの中から、既に他の AI ハンドに識別されておらず、かつ自身についての進捗率が最も高いタスクを求め、自身のタスクとして識別する。ユーザハンドと AI ハンドそれぞれのタスクを識別できた場合、AI ハンドは自身のタスクの進捗率がユーザハンドのタスクと一致するよう移動・回転等の運動を実行する。AI ハンドのタスクが識別できなかった場合、AI ハンドは初期位置で待機する。タスク進捗率の同期により、タスクの開始・終了等のタイミングがユーザと追加肢とで一致ようになる。この識別処理は常時行われるため、ユーザハンドの移動やタスクの新規生成等の要因により、AI ハンドのタスクは随時変更され、他のユーザハンドや AI ハンドとタスクが重複しないようになっている。

## 4. 結論

本稿では、追加肢の操作にかかる認知的・身体的負荷の軽減と行為主体感の生起を両立する半自律制御手法「SyncLimbs」を提案した。SyncLimbs は、追加肢に割り当てられたタスクの進捗率がユーザの手のタスクと一致するよう運動を実行することで、それぞれのタスクの開始・終了タイミングを同期させる。両者の運動同期により、ユーザは追加肢の

運動に対して行為主体感を生起すると考えられる。

しかし、タスクの内容が異なる場合に行為主体感が生起するかは十分に検証されていない。今後は、ユーザの手と追加肢の運動同期の有無やタスクに対する追加肢の協調の有無に応じた行為主体感について調査を行う予定である。

**謝辞** 本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 (JP-MJMS2013)、科研費基盤研究 (B)(25K03162)、挑戦的研究 (萌芽) (25K22814)、および JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2108) の支援を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] Christian I. Penalzoa and Shuichi Nishio. BMI control of a third arm for multitasking. *Science Robotics*, Vol. 3, No. 20, p. eaat1228, 2018.
- [2] Bireswar Laha, Jeremy N. Bailenson, Andrea Stevenson Won, and Jakki O. Bailey. Evaluating Control Schemes for the Third Arm of an Avatar. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 25, No. 2, pp. 129–147, 11 2016.
- [3] Hideki Shimobayashi, Tomoya Sasaki, Arata Horie, Riku Arakawa, Zendai Kashino, and Masahiko Inami. Independent Control of Supernumerary Appendages Exploiting Upper Limb Redundancy. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2021*, AHs '21, p. 19–30, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [4] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metalimbs: multiple arms interaction metamorphism. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [5] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Reo Matsumura, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Fusion: full body surrogacy for collaborative communication. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [6] Federico Parietti and H. Harry Asada. Supernumerary robotic limbs for aircraft fuselage assembly: Body stabilization and guidance by bracing. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1176–1183, 2014.
- [7] Baldin Llorens Bonilla and H. Harry Asada. A robot on the shoulder: Coordinated human-wearable robot control using coloured petri nets and partial least squares predictions. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 119–125, 2014.
- [8] Paul Reddish, Eddie M. W. Tong, Jonathan Jong, and Harvey Whitehouse. Interpersonal synchrony af-

fects performers' sense of agency. *Self and Identity*, Vol. 19, No. 4, pp. 389–411, 2020.

- [9] Wen Wen and Hiroshi Imamizu. The sense of agency in perception, behaviour and human-machine interactions. *Nature Reviews Psychology*, Vol. 1, No. 4, pp. 211–222, Apr 2022.