

群ロボットの身体化に関する予備検討

A Preliminary Study on the Embodiment of Swarm Robots

中川雅人¹⁾、柏野善大²⁾、吉田成朗^{2,3)}、稲見昌彦²⁾

Masato NAKAGAWA, Zendai KASHINO, Shigeo YOSHIDA, Masahiko INAMI

- 1) 東京大学 工学部計数工学科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, nakagawa-masato113@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)
 2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, {kashino, shigeo, drinami}@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)
 3) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (同上)

概要: 複数の個体群が協調して動作するシステムを、群ロボットシステムと呼ぶ。このようなシステムは高い頑強性・柔軟性・拡張性を備えている。ヒトの身体が群ロボットで構成されればヒトもこれら性質を獲得することができる。本研究ではヒトの身体全て、もしくは一部を群ロボットで代替する「群身体」を提案しコンセプトを検証するプロトタイプの構成、群ロボットの身体化に必要な条件を探る実験の結果を報告する。

キーワード: 群ロボット、身体化、群身体、群手

1. はじめに

群ロボットシステムとは、複数の個体群が連携しながら動くロボットで構成されるシステムのことである。群ロボットは従来のロボットと異なり、多数の同一種かつ小さな個体の群が個体間で情報交換を行い、協調することで大きな作用を及ぼすような運用が想定されている。これにより群ロボットシステムは高い柔軟性・頑強性・拡張性を備えている。例えば、災害の際にがれきをすり抜け埋まっている被害者を探索したり、協調して自分より大きく複雑な形状の荷物を運搬したりといった応用が考えられている。

もし、ヒトの身体が「群」で構成されるとどうなるだろうか。群ロボットによって構成された身体である「群身体」は、これまでにないほどの頑強性・柔軟性・拡張性をヒトに付与することになる。群の特性を得たヒトは、状況やタスクに応じて自在に身体の形状や機能を設計することが可能になる。例えば、群身体を持つヒトは構成するロボットが通れる隙間であればすり抜けられる(図1)。また、群を構成する一部の個体を失っても、他の個体が補うことで機能の低下を避けることが可能である。他にも、第三の腕のような追加の身体部位を、必要に応じて動的に構成可能である。

ただし、群ロボットシステムはその特性から操作と身体化が難しくなってしまう恐れがある。複数の個体を同時に操作する必要があるため、離散的かつ常に変動しうる要素は身体化を困難にすることが予想される。本研究では、群身体の実現と身体化に向けての第一歩として、身体部位の一部を群化する群身体部位を検証する。

操作性の観点からまずは手部の形成を試みた。具体的には手部をトラッキングし手部運動を群ロボットに反映することで、群ロボットにより構成された「群手」を提案する。本研究では群手を身体化するのに必要な条件を調べるため

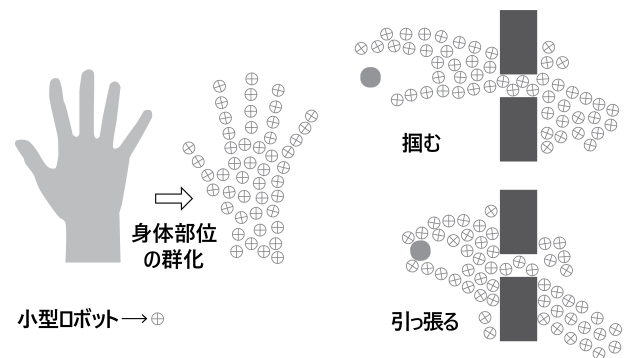


図1: 身体部位の群化による「群身体」のコンセプト図。

に、群ロボットシステムのプロトタイプを作成した。そして、身体化に必要な要素である身体所有感(対象を自分の体のように感じる感覚)の評価を行った。

2. 群ロボットシステムの構成

以下に、本システム構成の詳細を記す(図2)。

2.1 入力部

実験参加者の身体部位のうち群ロボットに動きを投影する手を、Ultraleap Stereo IR 170 (Leap Motion)¹⁾にて撮影した。Leap Motionは手のトラッキングを目的とした、赤外線ステレオカメラである。赤外線帯域で2視点から手の画像を撮影することにより、手の深度情報を推定し、手の姿勢情報を得ることができる。

2.2 出力部

本実験において群ロボットの要素個体として Sony Interactive Entertainment 社の小型車輪ロボット toio²⁾を用い

¹⁾<https://www.ultraleap.com/product/stereo-ir-170/>

²⁾<https://toio.io/>

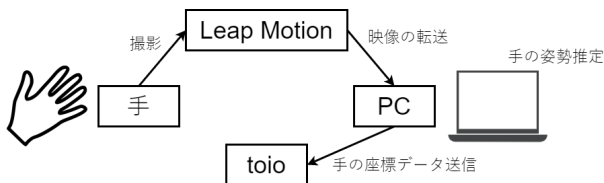


図 2: 本実験で用いた群ロボットのシステム構成。

た。toio は底部に 2 輪がついておりその 2 輪を制御することで平面上を自由に移動できる小型ロボットである。5 本指の先端に対応させるために本実験では toio を 5 台用いた。

付属のプレイマットを用いることにより、toio は自身のプレイマット上での 2 次元の絶対位置を取得できる。後述する処理部で計算された実験参加者の指先にあたる、プレイマット上での 2 次元座標を toio が受け取るたびに、そこを目標に toio が移動するプログラムを構築した。

2.3 処理部

Leap Motion によって撮影された映像は Leap SDK³により、腕・手首・掌・指の各関節の mm 単位の 3 次元の位置情報へと変換される。Leap SDK により取得された 3 次元位置情報は、matleap⁴により MATLAB へと送信される。MATLAB 内にて、Leap Motion が取得した手の 3 次元位置情報のうち Leap Motion のカメラの光軸方向の次元を削減して 2 次元の位置情報とした。(1) のように、2 次元の位置情報のうち、各指の先端の値から掌の値の 0.4 倍を引いたものを toio に送信する値とした。こうすることにより、手のサイズに対し平行移動の大きさが制限され、toio 同士の衝突を軽減しつつ、toio のプレイマットからはみだしを防止している。

$$\mathbf{x}_{\text{toio}}^{(i)} = \mathbf{x}_{\text{leap-f}}^{(i)} - 0.4 \times \mathbf{x}_{\text{leap-p}} \quad (1)$$

i : 各指に対応するインデックス

$\mathbf{x}_{\text{toio}}^{(i)}$: toio に送信される指先の 2 次元座標

$\mathbf{x}_{\text{leap-f}}^{(i)}$: LeapMotion が取得した指先の 2 次元座標

$\mathbf{x}_{\text{leap-p}}$: LeapMotion が取得した掌の 2 次元座標

処理された各指の 2 次元位置情報は 0.1 秒ごとに、Bluetooth Low Energy (BLE) により toio に送信される。位置情報の更新頻度 0.1 秒は toio が位置情報の更新を安定して受けられる中なるべく短い数字を選んだ。toio の目標位置の更新を早めるために、toio 同士が互いの位置情報を共有し、衝突を回避するような挙動は実装しなかった。

実験のためのパラメータとして、toio の移動速度と、位置情報データ送信の遅延を変更できるようにした。

3. 群ロボットの手への追従性能と身体所有感の関係に関する実験

本実験では、身体所有感を強く感じるほど身体化が進むであろうという仮説の下、群ロボットに対する身体所有感の強さを計測した。身体所有感の強さを計測するために、反応

³<https://developer.leapmotion.com/sdk-stereo-ir-170/>

⁴<https://github.com/tomh4/matleap>

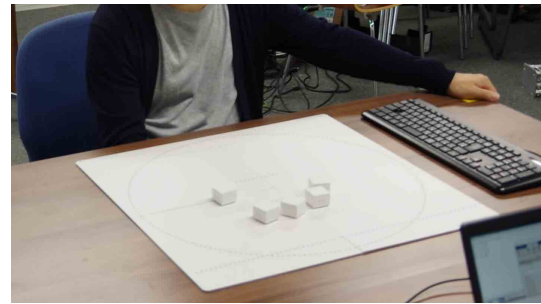


図 3: 実験中の実験参加者の様子。

時間の計測と主観評価についてのアンケートを行った。前者は、光点を身体部位や身体化された道具の近くに提示された際に、身体化されている場合より早い反応がある [3] という性質を利用した指標である。身体所有感の強さの変化に関して、順応タスクを行う前後と、各種パラメータ（移動速度・遅延）の違いに着目して、以下の手順で調査した。

1. 順応タスク前の光点提示反応時間計測とアンケート
2. 1 つ目のパラメータでの順応タスク
3. 1 つ目のパラメータについての光点提示反応時間計測とアンケート
4. 2 つ目のパラメータでの順応タスク
5. 2 つ目のパラメータについての計測
- ⋮
13. 6 つ目のパラメータについての計測
14. 実験全体を通しての感想を聴取

以下、実験設定、各計測や順応タスク、パラメータについての詳細を記す。

3.1 実験設定

実験参加者数は 7 名（男性 5、女性 2）であった。実験で toio の操作をする手は全員右手とした。はじめに実験に関する説明を実験参加者に行い、参加者の同意を得たうえで実験を実施した。参加者には実験装置を置いた机の前に座ってもらい、その状態で実験に参加してもらった。参加者には自分の元々の右手が見えないように右手を机の下に隠した状態で操作を行ってもらった。これは「見えている右手が自分の右手である」という視覚的バイアスを省くためである。そのため、Leap Motion は机の下の暗い環境に設置されているが、Leap Motion は撮影の際、赤外線をアクティブに投射するため、撮影に十分な明るさは確保されている。Leap Motion での誤認識を防止するため、実験中は参加者の左手を机の上においてももらった。本実験は所属機関の倫理委員会承認のうえ実施された。

3.2 toio に対する光点提示への反応時間の測定

光点の提示には PC に接続することでマウスとしても機能するレーザーポインタ INFINITER LR-8G を用いた。MATLAB にてマウスクリックとキーボード押下の時刻を記録するソフトウェアを作成した。記録ソフトウェアの、マウスクリックを検出するボタンにマウスカーソルを合わせ

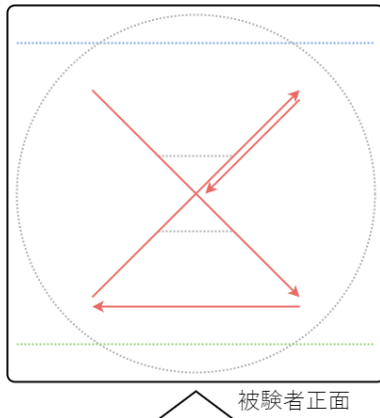


図 4: 順応タスクでの toio の移動順序。

て、実験者が LR-8G のレーザー照射ボタンとマウスクリックボタンを同時押し、実験参加者が toio に光点が見えた際に左手でキーボードのキーを押下することにより、光点提示の瞬間の時刻と実験参加者が反応した瞬間の時刻が記録される。上記 2 時刻の差を計算し、光点提示への反応時間とした。

3.3 主観評価についてのアンケート

以下の 6 つの質問を光点提示反応時間計測後に行った。アンケートは 7 段階で、全く当てはまらない際は 1 を、完全に当てはまる際は 7 を参加者に回答してもらった。

- toio を自分の手のように感じる
- 自分の元々の手は消えたように感じる
- toio は思い通りに動いている
- この体験はとても楽しく感じる
- 右手が 2 本あるように感じる
- 自分の手が toio のほうに移動したように感じる

3.4 順応タスク

順応タスクは、手を平行移動させることで目標地点への toio を移動させることと、手を開閉させることで toio を集合・離散させることの 2 つとした。toio の平行移動に関しては、図 4 のように実験者がレーザーポインタで目標地点を指示し、参加者が toio を目標地点に到着させるたびに、目標地点を実験参加者から見てプレイマットの左上・右下・左下・右上・中央の順に変化させていくという方法で行った。toio の集合・離散に関しては、平行移動のタスクで中央まで移動させたのち、実験参加者に手の開閉を 2 回繰り返してもらい、最後に手が開いている状態で toio を停止させて終了とした。

3.5 群ロボットの手への追従性能に関するパラメータ

実験中で変化させるパラメータは、toio の移動速度と toio へのデータ転送の遅延の 2 種類とし、どちらも 3 段階で変化させた。移動速度は低速 (3 cm/s)、中速 (15 cm/s)、高速 (30 cm/s) の 3 種類で、toio のハードウェア性能の上限・下限をカバーするように設定した。位置情報データ転送の遅延は追加なし (+0 s)、追加小 (+0.1 s)、追加大 (+0.2 s)

表 1: 身体所有感の計測を行う 7 条件。

条件	移動速度	データ転送遅延
1	順応タスク前	
2	3 cm/s	+0 s
3	15 cm/s	+0 s
4	30 cm/s	+0 s
5	15 cm/s	+0 s
6	15 cm/s	+0.1 s
7	15 cm/s	+0.2 s

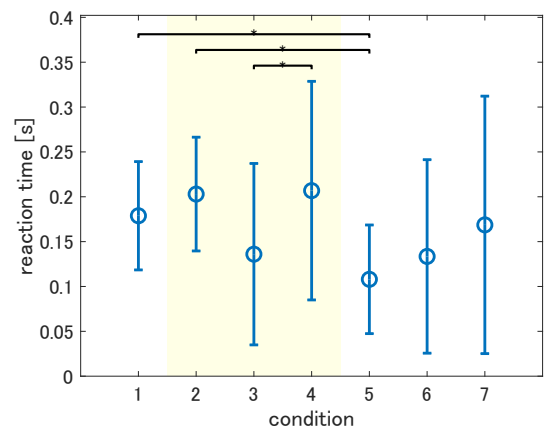


図 5: 光点提示への反応時間の平均と標準誤差。

の 3 種類で目標位置情報の更新頻度に合わせた。他方を変化させる際には、移動速度は中速に、データ転送遅延は追加なしで固定し、2 パラメータが同時に変化する際の作用は調査の対象としないことにした。以上より、計測を行う条件は表 1 のような 7 条件となる。順応タスクを繰り返すことによる学習の作用を抑えるため、条件 2-4・条件 5-7 のそれぞれの中で、実験参加者ごとにタスクの順番を変えた。

4. 結果

4.1 toio に対する光点提示への反応時間

実験参加者の反応時間の平均とその標準誤差は、図 5 のようになった。優位水準 0.05 におけるペア t 検定において、条件 1 と 5・2 と 5・3 と 4 の間に有意差が見られた。

4.2 主観評価についてのアンケート

3.3 で示した各質問への回答の平均と標準誤差は、図 6 のようになった。優位水準 0.05 におけるペア t 検定において、有意差は図 6 のようになった。

5. 考察

反応時間 (図 5) において、順応タスクの前と有意差があったのが条件 5 だけであったことや、パラメータを変えても有意差が出なかったこと、アンケートの「toio を自分の手のように感じましたか」という問いのスコアが低かったこと (図 6 (a)) などから、今回作成したシステムでは十

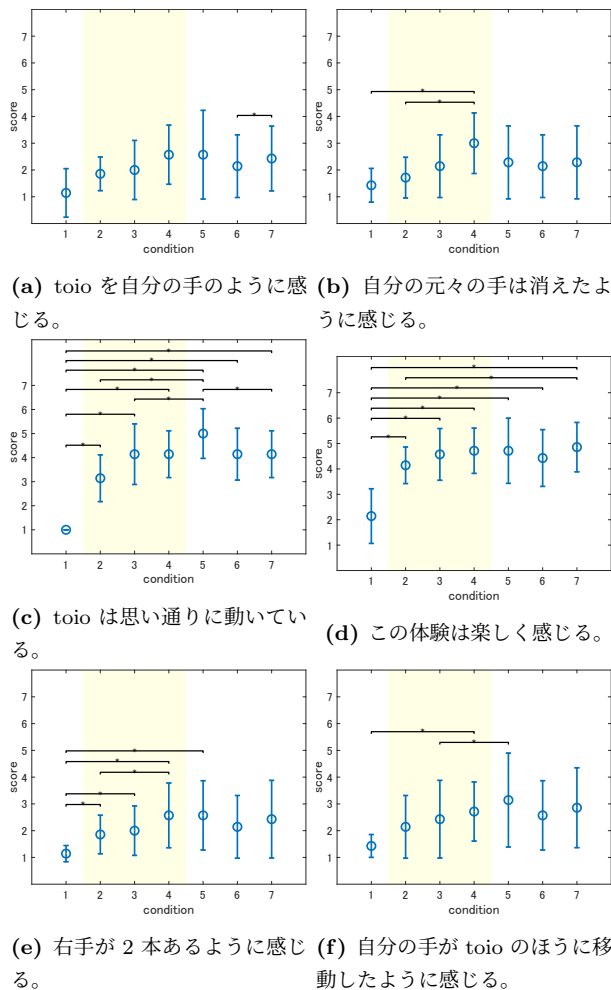


図 6: 各質問への回答の平均と標準誤差

分な身体化が達成できなかった可能性がある。身体化が達成されなかった原因として、ほとんどの順応タスクにおいて toio 同士が衝突してスタックを起し参加者の思い通りに動かなくなることが多発したことや、衝突せずとも toio が移動する際の協調動作が不十分であり本来の指同士の位置関係からずれてしまうことが多発したこと、Leap Motion や BLE での遅延によりパラメータとして追加した遅延がない状態においても手と toio の動き始めるタイミングに許容範囲外の遅延が発生したことなどが考えられる。

遅延に関しては、目標地点の更新頻度が 0.1 秒であるため、動き出しの遅延には最良と最悪の場合とで 0.1 秒の開きがある。また、本システムの手と toio とを同時に映したスローモーション映像から遅延を割り出したところ、0.15 秒ほどの遅延が見られた。つまり、遅延の追加がない状態でも 0.2 秒弱の遅延が存在していることになる。そのため、自分の動作に対して toio が動き始めるのが遅すぎて違和感を感じ始める範囲の 0.2 秒まで、遅延が大きくなってしまっていることも考えられる [4]。

スタックや協調動作については、今回のシステムが toio 同士で位置情報を共有するようになっていなかったことに原因があると考えられる。toio 同士がお互いの位置を把握し

て衝突を回避するようにすることで、身体化の障害が軽減されることが予想される。また、例えば薬指・小指をトラッキングするのをやめ、その 2 か所の目標位置を人差し指・中指の位置からプロシージャルに生成するなど、余計な自由度を削るというアプローチにも可能性がある。

スタックの他の原因として Leap Motion のトラッキングが外れてしまい、意図通りの操作ができなくなってしまった場合も見られた。今回は実験システムの構築の簡単さから Leap Motion を選択したが、身体化を促進するという観点からは、よりトラッキングロストしづらい光学マーカー式などの採用も考えられる。ただし、Leap Motion には身体に何も身に着けることなく非接触でトラッキングできるというメリットもあるため、システムの使用開始時の準備の大変さが増すといったデメリットは存在する。

また、今回の順応タスクにおいては toio の操作を行っただけであったが、実験最後の感想の聴取の際、一部の実験参加者に toio を用いて軽いプラスチック片を動かして遊んでもらった。すると、実験中の順応タスクよりも面白いという感想が得られた。これは、身体部位としての手は外界に働きかける要素も強く持っているため、プラスチック片を動かしたことにより手としての本来の機能がより強く意識され、面白い体験になったことが予想される。

6. むすび

今回の実験においては、群ロボットならではの個体同士の協調性・柔軟性や、手の身体としての機能への考察が甘く、どちらの特性も生かしきれないシステムになってしまった。手に関しては、外界に働きかける器官であるという機能的な面から、実験設計の際は順応タスクに外界に働きかける要素を組み込むべきだったのではないかとと思われる。ロボットが協調して動作する際の目標としても、外界に働きかけるというタスク設計は必要であったと考えられる。今後も以上を考慮したシステム設計と実験設計を行い、群身体体の構築と評価を行っていく。

参考文献

- [1] Aymerich-Franch, L., Petit, D., Ganesh, G., & Kheddar, A. (2017). Non-human looking robot arms induce illusion of embodiment. *International Journal of Social Robotics*, 9(4), 479-490.
- [2] 渡邊恵太, 樋口文人, 稲見昌彦, & 五十嵐健夫. (2013). 複数ダミーカーソル中における自分自身のカーソル特定. *情報処理学会インタラクシオン*.
- [3] Reed, C.L., Betz, R., Garza, J.P. et al. Grab it! Biased attention in functional hand and tool space. *Attention, Perception, & Psychophysics* 72, 236-245 (2010). <https://doi.org/10.3758/APP.72.1.236>
- [4] Allison, R. S., Harris, L. R., Jenkin, M., Jasiobedzka, U., & Zacher, J. E. (2001, March). Tolerance of temporal delay in virtual environments. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001* (pp. 247-254). IEEE.