

卓上と壁の間を移行する群ロボット corobos における アタッチメントの改良

中川 陽介^{1,a)} 韓 燦教^{2,b)} 苗村 健^{1,c)}

概要：

我々は以前、小型ロボット同士が協力し、卓上と壁面の間を移行する群ロボットプラットフォーム「corobos」を提案した。群ロボットが卓上と壁面を行き来できるようになることで、卓上にあるものを壁に移動させるなど、室内空間を動的に変容できると期待される。corobos は小型ロボットに 3D プリントしたアタッチメントを装着することで、卓上と壁面の移行を実現する。本稿では、以前の 3 種類のアタッチメントを 1 種類に減らし、全てのロボットが自由に移行できるようにすることで、システム全体の柔軟性を向上させた。また、移行しやすいアタッチメントの形状を設計し、形状ごとの移行率の評価を行った。さらに、卓上と壁面を移行する corobos をユーザが自由に配置するデモを作成した。

1. はじめに

産業用ロボットだけでなく様々なロボットが我々の生活環境へ導入されている。床掃除ロボットが普及しているように、移動するロボットが人間の活動する空間のあらゆる場所に存在し、活動を支える日も遠くないであろう。中でもインタフェースの分野では、主に卓上で利用される TUIs (Tangible User Interfaces) に小型ロボットによる自律行動機能を搭載した Actuated TUIs の研究が進んでいる。

このような流れの中で、インタフェースとして群ロボットを用いる Swarm UI に注目が集まっている。群ロボットとは、単純な機能を搭載した小型ロボットが複数台で協力することにより、様々なアプリケーションを実現するものである。Swarm UI は、単体での人間とのインタラクションと、全体の形状による情報提示が可能であることを特徴としており、それらの多くはロボットの移動により達成される。

そのため群ロボットの移動能力を高めることは重要である。しかし、群ロボットの移動範囲は、壁面 [1]、空中 [2]、服表面 [3] と広がっているものの、主に水平面、特に卓上 [4]、[5] で使われることを前提としている。一方、壁面は人間とのインタラクションにおいて有望であるとされているが [6]、卓上と壁面の間を移行する swarm UI はまだ存在

していない。

そこで、我々は卓上と壁面の間を移行する群ロボット corobos を提案、実装した [7]。corobos は卓上と垂直な壁面の間に移行のための構造物を置くことなく、ロボット同士が協調動作することで移行を行う。corobos はロボットトイの toio™ [8] をベースとしており、磁石を取り付けることで強磁性体の壁面に吸着する他、3D プリントしたアタッチメントと呼ばれる外部パーツを一部のロボットに取り付けている。アタッチメントを取り付けたロボットは他のロボットを 90 度回転させ、卓上と壁面の間を移行させる。ただし、移行させるロボットが電池切れや故障等で機能しなくなった場合を考えると、全てのロボットが同じ機体として扱える方が望ましいと考えられる。

本提案では、図 1 のように全てのロボットに 1 種類の共通アタッチメントを取り付けることで、卓上と壁の間を移行させることを目指す。なお本稿では、卓上と壁面の間を移動を通常の移動と区別して移行と呼ぶこととする。

2. 関連研究

2.1 壁面に吸着するロボット

壁面へ吸着するロボットは、Wall climbing robot として 1990 年以降に盛んに研究されてきた [9]、[10]。例えば、Nguyen らは強磁性体の建造物の検査を目的とした多方向自転車型ロボット [10] を開発している。前後の磁性のある車輪により建造物表面に吸着し、複雑な形状にも適応できるように設計されている。

一方、このようなロボットとは異なり、屋内壁面へ吸着

¹ 東京大学大学院 情報理工学系研究科

² 東京大学大学院 情報学環

a) nakagawa@nae-lab.org

b) hanc@nae-lab.org

c) naemura@nae-lab.org

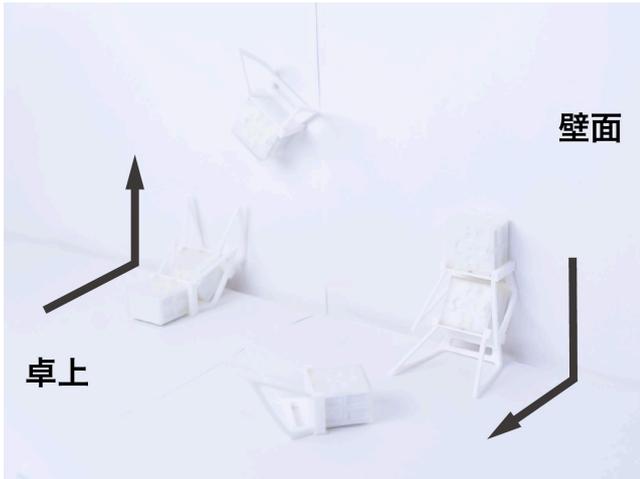


図 1 卓上と壁面の間を移行する群ロボットプラットフォーム:
corobos

するロボットも存在する。iRobot 社の Root™ [11] は、底面に入っている磁石でホワイトボードに吸着する自走型ロボットであり、ホワイトボード上に線を描く・消すといった動作も可能である。

以降、壁面への吸着は磁力によるものとし、ロボット本体に永久磁石を取り付け、壁面は強磁性体であるものとする。

2.2 群ロボット

分散化され密接に協力し合う集団は、一般に群れ(群)と呼ばれ、協調することで個々の力を超えるような作業を行うことができる。同様に群ロボットは協力することで様々な協調動作を実現する。

中でも Zooids [4] では、全体の形状で情報提示を行うだけではなく、個のロボットを用いて人間が操作するといったインタラクションが可能である。また、HERMITS [12] では、改造した小型ロボットに mechanical shell と呼ばれる着脱可能な外付け部品を接続することで個体としてのロボットの能力を拡張しており、また協調作業をさせることで群ロボットとしての応用を示した。

群ロボットの研究の多くは卓上で利用に限定される傾向にある。一方、壁面での群ロボットの利用は UbiSwarm [1] で考察されており、室内空間のあらゆる場所に群ロボットが存在するビジョンが示されている。ここでは群ロボットが卓上と壁面の間を移行する方法として、壁面と卓上の角に磁性体のスロープを置く手法が述べられている。しかし、この方法では移行可能な場所がスロープがある場所に限定され、スロープが卓上にあることで人間の活動を常に阻害してしまうというデメリットが存在する。

3. 卓上と壁の間を移行する群ロボット： corobos

3.1 以前の設計

我々は以前、卓上と壁の間を移行する群ロボット corobos を発表した [7]。

一般的な 2 輪駆動する小型ロボットにおいて、移行時には 90 度の回転を必要とする。設置型のスロープを用いない場合は、車輪が地面から浮いてしまい動力を伝えにくく、1 台のみで移行を実現することは難しい。

corobos では複数台で協力する事により、設置型のスロープを用いない移行を実現している。以前の設計では、少数のロボットにのみアタッチメントと呼ばれる外部パーツを取り付け、他のロボットを移行させている。

アタッチメントは 3 種類あり、push、T2W (table-to-wall)、W2T (wall-to-table) である。卓上から壁面への移行には、移行するロボットの他に、push と T2W のアタッチメントを取り付けたロボットが 1 台ずつ必要で、壁面から卓上への移行には push と W2T アタッチメントを取り付けたロボットが 1 台ずつ必要である。

3.2 今回の設計方針

以前の corobos では移行するロボットにはアタッチメントを付けず、4 台程度の移行させるロボットのみにはアタッチメントを取り付ける事で、ロボット同士が協力し移行することができた。これにより、移行するロボットを増やしてもアタッチメントを増やすことなく移行が可能である。ただし、移行させるロボットが電池切れや故障等で機能しなくなった場合、役割を交代させるには人の手でアタッチメントを交換する必要がある、互換性がないというデメリットがあった。

本提案では、全てのロボットに 1 種類の共通アタッチメントを取り付けるだけで、ロボットが卓上と壁の間を移行できることを目指す。これにより、ある 1 台が動かなくなったとしても、他の 1 台が代わりとなることができ、システム全体としての柔軟性が向上することが見込まれる。

3.3 移行メカニズム

本提案では卓上から壁面、壁面から卓上のどちらの移行でも、移行させるロボット 1 台と移行するロボット 1 台、計 2 台のロボットを使用する。移行するロボットは後方下部をもう一方のロボットから押しもらい、壁に押し付けられることで 90 度の回転を実現する。

アタッチメントを図 2 のように改良し、全てのロボットに装着させることを考える。アタッチメントには push と slope という 2 種類の役割があり、それぞれ図 2 で示す部分に対応している。push は他のロボットの後方下部を押す役割で、slope は押された際に自身を 90 度回転させる役割

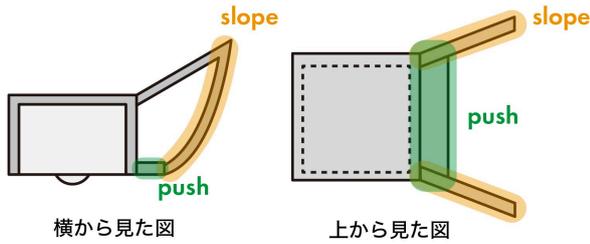


図 2 群ロボットに装着するアタッチメント: 他のロボットの後方下部を押すための push とロボット自身が 90 度回転するための slope からなる.

である. slope の部分は側方に広がった形に設計した. これは, 前のロボットを push 部分で押して回転させる際に, 前のロボットが slope 部分に当たらないようにするためである.

卓上から壁面への移行では, 図 3 のように移行を行う. 以下の説明では移行させるロボット (青) を A, 移行するロボット (赤) を B と呼ぶ.

- (1) 卓上の A, B を 1 直線に並べる.
- (2) A が B を押す事により, B が壁に押し付けられ回転する.
- (3) B が磁石の力で壁面に吸着する.
- (4) 移行が完了し, B は壁面で走行する.

また, 壁面から卓上への移行を図 4 に示す. 卓上から壁面への移行と同様に, 以下のような手順で移行を行うことができる.

- (1) 壁面の A, B を 1 直線に並べる.
- (2) A が B を押す事により, B が卓上に押し付けられ回転する.
- (3) B が卓上に着地する.
- (4) 移行が完了し, B は卓上で走行する.

以前の corobos では, 卓上から壁面に移行する際, 90 度の回転を行った後に壁面まで押して吸着させ移行するという手順であった. 今回の設計では前のロボットを押すだけで移行が可能となっている.

4. 実装

4.1 使用するロボット

本研究ではロボットトイである toio™ [8] を利用する. toio は特殊な紙面上に置くことで, 目視できない程度の微細に印刷されたマークを読み取り, 自身の紙面上での位置情報を取得できる. ロボットは BLE 接続により PC と接続し, Unity により制御を行った.

また, toio の底面に薄型ネオジム磁石 (丸型直径 12 mm, 厚さ 1.3 mm, 表面磁束密度 200 mT) を貼り付け, ホワイトボードの壁へ吸着できるようにした.

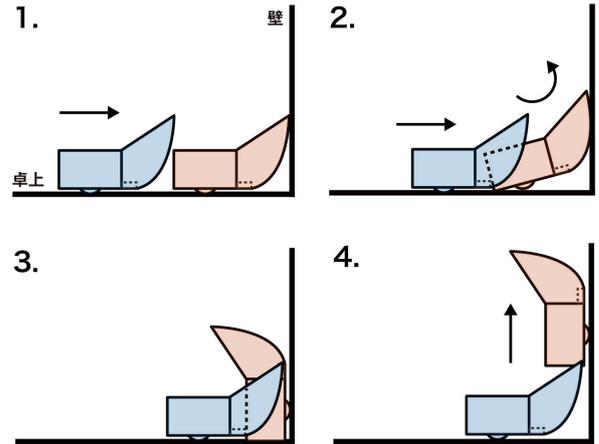


図 3 卓上から壁面への移行方法

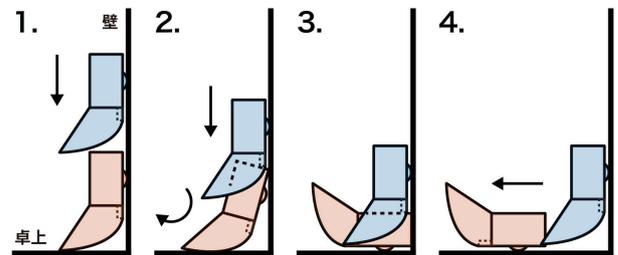


図 4 壁面から卓上への移行方法

4.2 アタッチメントの実装

移行を実現させるため, toio2 台に図 5 のようなアタッチメントを設計, 3D プリンタで印刷し, 取り付けた. 設計の際, 図 5(d) に示すように 4 つのパラメータを考慮した. ここで, $push_w, push_h$ はそれぞれ push 部分の横幅と高さ, $slope_w, slope_h$ はそれぞれ slope 部分の横幅と高さである.

次にこれらのパラメータの決定手順を図 6 を用いながら説明する. push 部分について, 他のロボットを押して回転させる際, 回転モーメントの関係からなるべく低い位置を押した方が良い. そのため, $push_h$ については試作して toio を安定して押せる最低の値であった 5.0 mm とした. push 部分で前方のロボットを押す際には push 部分上方の角が接することとなる. 押していくと前方のロボットが徐々に傾いていくが, この時前方ロボットの上面が当たらないような $push_w$ が望ましい. そのために必要な長さを $need_w$ とする. ロボットや push が直方体であると想定し, ロボットの高さを $robot_h$, ロボットが回転した角度を θ とおくと, $need_w$ は

$$need_w = robot_h \sin \theta - push_h \tan \theta \quad (1)$$

である. $\theta = 0^\circ$ から $\theta = 90^\circ$ における $need_w$ の最大値が $push_h$ が必要最低限必要な長さである. これは,

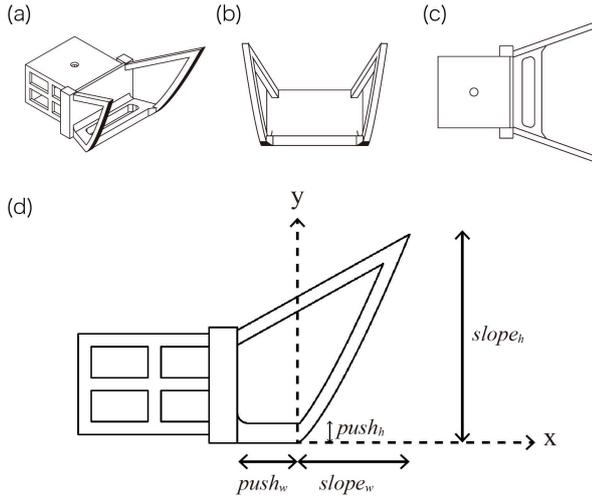


図 5 作成したアタッチメントの外観とパラメータ: (a) 斜めから見た図 (b) 正面から見た図 (c) 上から見た図 (d) 横から見た図

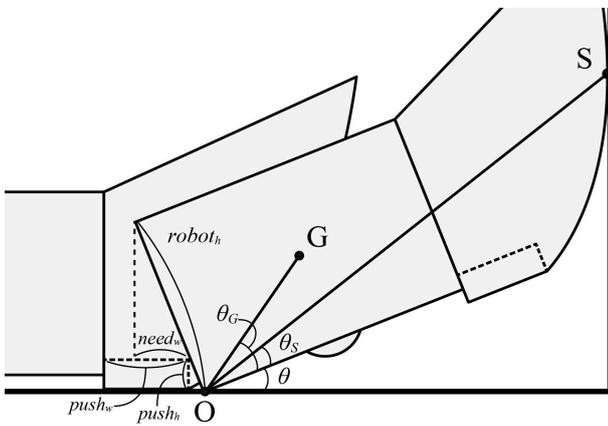


図 6 corobos の移行途中の様子

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{push_h}{robot_h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

のときである。 $push_h = 5.0 \text{ mm}$, $robot_h = 25.8 \text{ mm}$ (アタッチメントの厚み 1.5 mm を含む) を式 (2) に代入して θ を求め、さらに式 (1) に代入して、 $need_w = 15.0 \text{ mm}$ を得た。これが必要な長さの最大値なので、これを $push_w$ とした。

$slope_w$ は前のロボットを押し 90 度回転させた際に前のロボットと干渉しないよう、ロボットの高さと同じ長さとした。 $slope_h$ はロボットと同じ高さでは回転モーメントが足りず、移行ができなかった。十分な高さでアタッチメントの重心を考慮して試作を重ねた結果、 $slope_h$ は $toio$ の高さの 2 倍である 48.6 mm とした。

次にアタッチメントの $slope$ 部分の形状について説明する。以降では、図 5(d) のようにアタッチメント側面から見た時の xy 座標を利用する。原点は $push$ の先端下部であり、点 $(slope_w, slope_h)$ が $slope$ の頂点である。ロボットが滑らかに回転することができるように $slope$ の形状は凸型

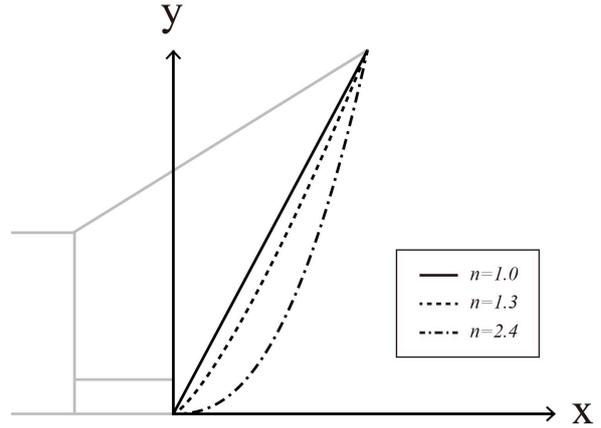


図 7 作成したアタッチメントの形状の比較

が望ましい。そのため今回は以下の式 (3) で表される曲線を設計に用いた。ただし n は 1.0 以上の実数である。

$$y = slope_h \cdot \left(\frac{x}{slope_w} \right)^n \quad (0 < x < slope_w) \quad (3)$$

$slope$ の形状を決定するために、 n を 1.0 から 3.0 まで変化させ、それぞれ移行に必要な最低限の力を求めた。具体的な手順としては、 x 座標 0 から $slope_w$ までを等間隔に 1000 分割し、各値について対応する曲線上の点で移行中のロボットが壁と接する際に、モーメントの釣り合いから回転に必要な力を式 (4) で計算し、その最大の力を求めた。

$$P = \frac{mg \cdot OG \cdot \cos(\theta + \theta_G)}{OS \cdot \sin(\theta + \theta_S)} \quad (4)$$

ここで、 m はロボットの質量、 g は重力加速度、 OG と OS はそれぞれ回転中心から重心までの距離と壁との接点までの距離である。また、 θ はロボットの回転角度、 θ_S は直線 OS とロボット底面のなす角、 θ_G は直線 OG とロボット底面のなす角である。今回、重心の位置は $toio$ の中央として計算した。

結果を図 8 に示す。この結果から $n = 1.3$ の時に回転に必要な力が小さく、移行がしやすいと考えられる。

結果を受け、アタッチメントを実際に設計し、移行率及び移行時間の比較実験を行った。実験は図 7 のように、 $n = 1.0$ と $n = 1.3$, そして必要最低限の力がその平均に近い $n = 2.4$ の 3 つのアタッチメントで行った。実験条件は以下のとおりである。まず、卓上と壁面のホワイトボードに $toio$ 動作用の紙を貼り付けて固定した。スクリプトは Unity で動作させ、 $toio$ のモータ速度指定を最大として前のロボットを押しした。押し始めてから 5 秒以内にロボットが 90 度回転し、壁面の用紙のマーカを認識できれば成功とし、できなければ失敗とした。移行時間については、押し始めてから壁面用紙を認識するまでを測定している。 60 fps で実行しているため、誤差は 0.017 s 程度見込まれる。

移行率を測定した結果を表 1 に示す。壁面から卓上では全てのアタッチメントで 100 回試行中 100 回成功した。こ

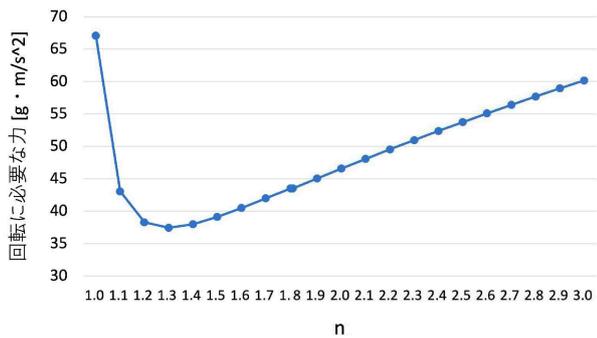


図 8 slope の形状と回転に必要な力の関係

表 1 アタッチメントの形状と移行成功率の関係

n	移行率 (%)	
	卓上から壁面	壁面から卓上
1.0	51	100
1.3	100	100
2.4	100	100

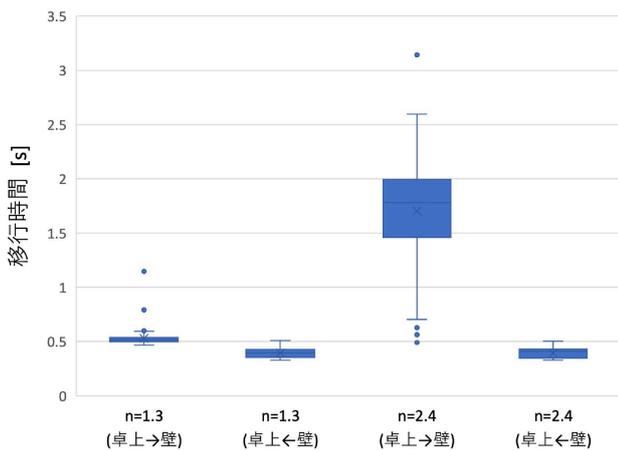


図 9 アタッチメントの形状と移行時間の関係

これは slope 部分が卓上へ押し付けられた際、ある程度回転してしまえば磁石の吸着が弱まり、重力の影響で回転できるためと考えられる。一方卓上から壁面では、 $n = 1.3, 2.4$ では 100 回移行に成功したが、 $n = 1.0$ では 51 回となった。これは push 部分と slope 部分の境目で急激に傾きが変化するためと考えられる。

また移行時間について $n = 1.3, 2.4$ についてまとめた結果を図 9 に示す。壁面から卓上についてはほぼ差は見られないが、卓上から壁面に関しては、平均時間を比較すると $n = 1.3$ では 0.53 s、 $n = 2.4$ では 1.70 s となった。また、標準偏差も $n = 1.3$ では 0.006、 $n = 2.4$ では 0.239 となるため、 $n = 1.3$ の方が早く安定して移行できる。そのため曲線の形状は式 (3) に $n = 1.3$ を代入したものに決定した。

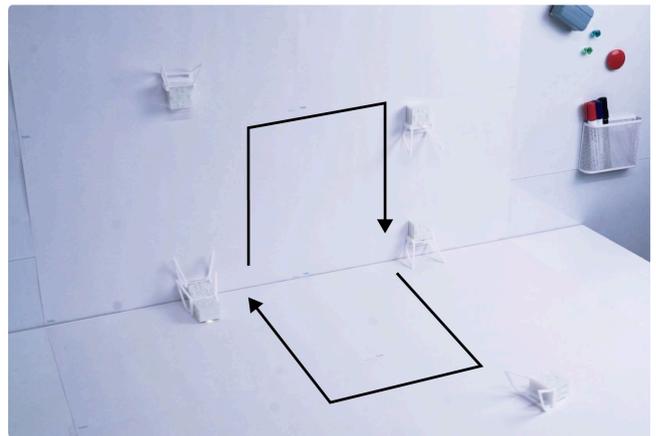


図 10 卓上と壁面を周回するデモ: corobos は卓上から壁、壁から卓上へ移行することが出来るため、卓上と壁面間を周回することができる。

5. デモンストレーション

本節では作成した 2 種類のデモを紹介する。1 つ目は corobos が卓上と壁面を周回するデモであり、安定して移行ができることでスムーズに corobos が周回する。また、2 つ目は、corobos と人のインタラクションの例として、文字が書かれた corobos を人が並び替えるデモである。

5.1 卓上と壁面を周回する corobos

このデモでは、卓上に置いた corobos が他のロボットを押し、また押しもらうことで壁面へ移行し、壁面から卓上へ移行する。そして壁面でも同じことを行うことで卓上から壁面へ移行する。そのため、3 台以上であれば卓上から壁面を周回することができる。どの corobos も同じ役割を有しており、1 台が動かなくなったとしても別のロボットが代わりとなることができる。

5.2 corobos と人のインタラクション

人が corobos を卓上に置くことで、特定の corobos が卓上から壁面へ移行するデモを作成した。

このデモでは corobos にそれぞれ文字が 1 つ書かれており、人は corobos を配置することで、文字を自由に並び替えることができる。並び替えた corobos は、卓上で互いを認識しながら協力して卓上から壁面へ移行する。そして、壁面においてあらかじめプログラムされた特定の文字列へと整列する。

6. まとめ

本稿では我々が以前提案した、協力することで卓上と壁の間を移行する群ロボット corobos のアタッチメントの改良案を示した。以前の corobos は一部のロボットに 3 種類のアタッチメントを取り付けることでアタッチメントのな



図 11 corobos と人のインタラクション: 卓上の文字が書かれた corobos を人が自由に配置すると, corobos は協力しながら壁面に移行し, 指定した文字の順に整列する。

いロボットを移行させていたが, 本提案では全てのロボットに1種類のアタッチメントを取り付けることで, 全てのロボットが移行することができる。これによりロボットが互いに役割を交替することができ, システム全体の柔軟性が向上した。また評価として, スムーズな移行を実現するアタッチメントのパラメータを決定するための実験を行った。そして, 卓上と壁面を周回するデモ及び corobos と人がインタラクションするデモを作成した。

今後, 2 壁面間の移動や天井への移動といった corobos の移動能力の拡張, またその活用方法について検討を行う予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21K17778 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kim, L. H. and Follmer, S.: UbiSwarm : Ubiquitous Robotic Interfaces and Investigation of Abstract Motion as a Display, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 3 (2017).
- [2] Chung, S. J., Paranjape, A. A., Dames, P., Shen, S. and Kumar, V.: A Survey on Aerial Swarm Robotics, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 4, pp. 837–855 (online), DOI: 10.1109/TRO.2018.2857475 (2018).
- [3] Dementyev, A., Kao, H.-L., Choi, I., Ajilo, D., Xu, M., Paradiso, J. A., Schmandt, C. and Follmer, S.: Rovables: Miniature on-body robots as mobile wearables, *Proceed-*

- ings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 111–120 (2016).
- [4] Le Goc, M., Kim, L. H., Parsaei, A., Fekete, J.-D., Dragicevic, P. and Follmer, S.: Zooids: Building Blocks for Swarm User Interfaces, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16*, New York, New York, USA, ACM Press, pp. 97–109 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984547 (2016).
- [5] Nakagaki, K., Tappa, J. L., Zheng, Y., Forman, J., Leong, J., Koenig, S. and Ishii, H.: (Dis)Appearables: A Concept and Method for Actuated Tangible UIs to Appear and Disappear based on Stages, pp. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3491102.3501906 (2022).
- [6] Yan, Z., Sathya, A., Carvalho, P., Hu, Y., Li, A. and Peng, H.: Towards On-the-wall Tangible Interaction: Using Walls as Interactive, Dynamic, and Responsive User Interface, *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, (online), DOI: 10.1145/3411763.3451586 (2021).
- [7] 中川陽介, 韓 燦教, 苗村 健: corobos: 卓上と壁の間を移行する群ロボット, *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2022 論文集*, Vol. 2022, pp. 106–109 (2022).
- [8] Sony Interactive Entertainment: Toy Platform toio™, <https://www.sony.com/SonyInfo/design/stories/toio/>, accessed: July-20-2022.
- [9] Inoue, K., Tsurutani, T., Takubo, T. and Arai, T.: Omni-directional gait of limb mechanism robot hanging from grid-like structure, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1732–1737 (online), DOI: 10.1109/IROS.2006.282133 (2006).
- [10] Nguyen, S. T., Nguyen, H., Bui, S. T., Ho, V. A. and La, H. M.: Multi-directional Bicycle Robot for Steel Structure Inspection, (online), available from <http://arxiv.org/abs/2103.11522> (2021).
- [11] iRobot: Programming Robot Root™, <https://edu.irobot.com/jp>, accessed: Dec-18-2022.
- [12] Nakagaki, K., Leong, J., Tappa, J. L., Wilbert, J. a. and Ishii, H.: HERMITS: Dynamically Reconfiguring the Interactivity of Self-Propelled TUIs with Mechanical Shell Add-Ons, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 882–896 (online), DOI: 10.1145/3379337.3415831 (2020).