

corobos plus: 卓上・壁面・天井の間を移行する群ロボット

森村 太一^{1,a)} 韓 燦教^{2,b)} 苗村 健^{2,c)}

概要:

筆者らは以前、卓上と壁面の間を移行する corobos を開発し、群ロボットの移行可能な範囲を広げることに成功した。本稿では、corobos をさらに改良することで卓上・壁面・天井の間を移行を実現した”corobos plus”を提案する。パラメータの異なるアタッチメントの設計を行い、パラメータごとの移行率の評価を通して、安定した移行が可能なアタッチメントの形状を提案した。また、人が任意の面に配置した corobos plus が卓上・壁面・天井を周回するデモを作製した。

1. はじめに

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。なかでも、TUIs (Tangible User Interfaces) として群ロボットを用いる Swarm UI に注目が集まっており、群ロボットのさまざまな活用が研究されている。主な利用は水平面、特に卓上 [1], [2], [3] であるものの、壁面 [4] や天井 [5], [6] においても多様な活用の方法が提案されてきた。そのため、群ロボットの移行能力を高めることは、インタラクション可能な空間のさらなる拡大につながると思われるが、異なる面の間を移行する Swarm UI は存在しなかった。

これに対し筆者らは以前、卓上と壁面の間を移行ができる群ロボット”corobos” [7], [8], [9] を開発した。corobos は、3D プリンタで造形された一種類のアタッチメントを各ロボットに装着するだけで、卓上と壁面の間を移行できるようになるという特長があったが、壁面と天井の間を移行は未達成であった。そこで本稿では、corobos の特長を引き継いだまま移行範囲を天井まで拡張した、”corobos plus” (図 1) を提案する。corobos plus は卓上・壁面・天井の間を移行できるため、群ロボットが空間内でより広く動き回ることができるようになると思われる。

なお本稿では、異なる面の間を移動を、同一平面内の移動と区別して「移行」と呼ぶこととする。



図 1: 卓上・壁面・天井の間を移行する群ロボット: corobos plus

2. 関連研究

2.1 卓上や壁面、天井における群ロボットの活用

これまで群ロボットのさまざまな活用の可能性が検討されてきており、その活用は卓上だけでなく、壁面や天井でも行われている。

卓上で使用される HERMITS [3] では、小型ロボットを改造し、さらに mechanical shell と呼ばれる着脱可能な外部パーツを取り付けた。これにより個々のロボットの能力を拡張するとともに、共同作業を行わせることで群ロボットとしての応用可能性も示した。

壁面における群ロボットには、UbiSwarm [4] があげられる。UbiSwarm では、小型ロボットの底面に磁石を取り付け、ホワイトボードに吸着させて群ロボットを活用している。この研究では、ロボットがユビキタス化し、人や環

¹ 東京大学大学院 学際情報学府

² 東京大学大学院 情報学環

a) morimura@nae-lab.org

b) hanc@nae-lab.org

c) naemura@nae-lab.org

境とインタラクションすることを目指しており、ロボットの移動能力が高まることの重要性を指摘している。iRobot社のRoot™ [10]も、群ロボットではないが、底面に内蔵された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、ホワイトボードに文字を書いたり消したりといったインタラクションが可能である。

また、天井における群ロボットの活用としてThrowIO [5]やAeroRigUI [6]がある。ThrowIOは、強磁性体の天井面と群ロボットを活用することによって、人とコンピュータの間の投げる・捕るのインタラクションを実現させたものである。またAeroRigUIでは、天井の群ロボットと物体を糸で結びつけて、物体の位置や向きを自由に制御可能にすることで、3次元空間における情報提示やインタラクションが行われた。

なお以上のような研究をふまえ、壁面や天井への吸着方法は、ロボット本体に永久磁石を取り付けた上で、強磁性体の卓上・壁面・天井に吸着するものであると考える。

2.2 面と面の間を移行するロボット

Nguyenらは強磁性体の建造物の検査を目的として、面と面の間を移行できる、2本の大きな脚を持つロボット [11]や、自動車型のロボット [12]を開発した。しかしながらこのような機構は、ロボットが複雑かつ巨大化するため屋内の小型ロボットには適さない。また、FreeBOT [13]は単体で面間の移行が可能な球状のロボットであるが、その形状がゆえに、ものを1方向へ押す・引っ張るといった人やものとのインタラクションに適しているとはいえない。

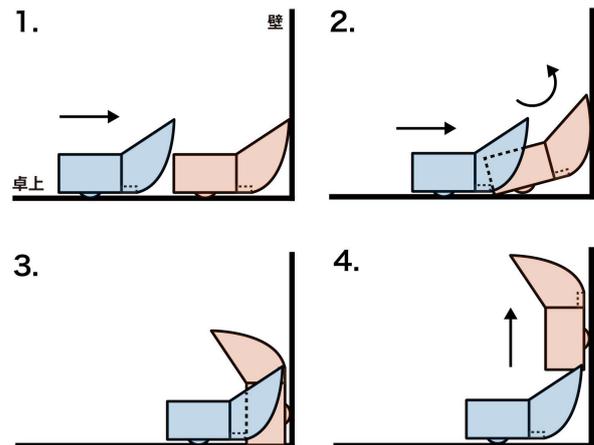
3. corobos plus: 卓上・壁面・天井の間を移行する群ロボット

3.1 以前の設計

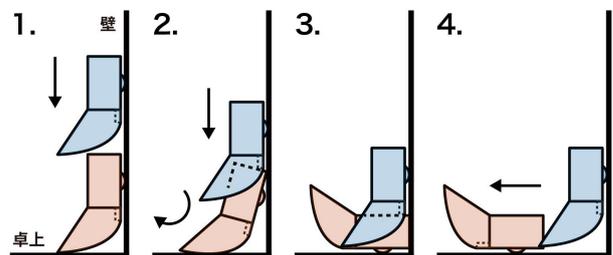
筆者らは以前、群ロボットcorobosにおいて卓上と壁面の間を移行を実現した。corobosでは、群ロボットとしてよく用いられているtoio™ [14]が1台のみでは面と面の間を移行が難しいという問題を、移行するロボットをもう一台の移行させるロボットで後ろから押すことによって解決した。具体的には、アタッチメントと呼ばれる3Dプリンタで造形された外部パーツを各ロボットに装着し、図2のような手順で移行を行っていた。このcorobosでは、1種類の共通のアタッチメントをロボットに装着するだけで移行ができるようになるため、どのロボットも移行するロボットにも移行させるロボットにもなることができ、システムの柔軟性が高いという特長があった。

3.2 今回の設計方針

本提案では、卓上・壁面・天井の間を移行する群ロボットの実現を目標とする。以前のcorobosは、卓上と壁面の間を移行のみを目指したものであった。corobosの壁面と



(a) 卓上から壁面への移行



(b) 壁面から卓上への移行

図 2: corobos の移行メカニズム [8]

天井の間を移行能力を確認したところ、無理に壁面から天井を移行させようとする、移行できずに落下した。また天井から壁面を移行させようとしても、移行自体はできるが、大幅に落下しながら壁面に吸着するという様子であった。そこで本提案では、corobosのアタッチメントをさらに改良することで、ロボットの移行可能な範囲を天井まで拡張することを目指す。具体的には、以下の4点を設計の方針とした。

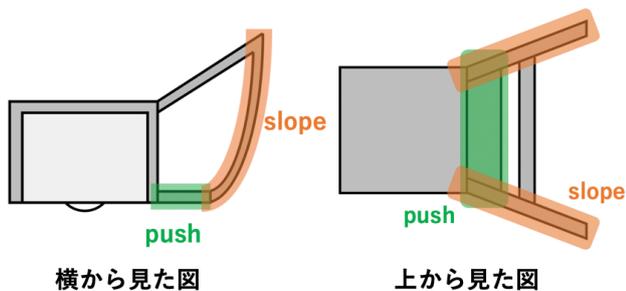
- (1) 壁面から天井へのスムーズな移行を実現すること
- (2) 天井から壁面への移行の際の落下幅が小さいこと
- (3) 卓上と壁面の間を移行を損なわないこと
- (4) システムの柔軟性を保つために、アタッチメントの種類は1種類のまま増やさないこと

これにより、ロボットが部屋のどの面にも移行できるようになり、インタラクション可能な空間が大きく拡大することが見込まれる。

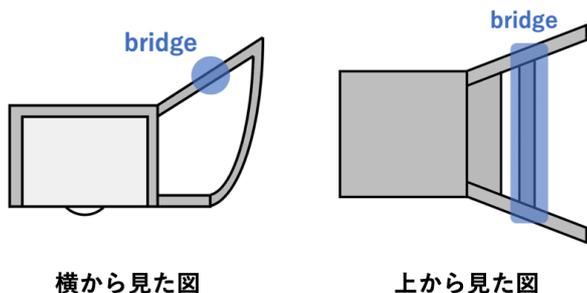
3.3 移行メカニズム

本節では、主に壁面と天井の間を移行のメカニズムについて説明する。卓上と壁面の間を移行については、corobosのメカニズムを引き継いでいる。

本提案では、アタッチメントを図3のように改良し、各



(a) 従来のアタッチメント: 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



(b) corobos plus のアタッチメント: 壁面と天井間の移行で他のロボットを支える bridge を追加する

図 3: 群ロボットに装着するアタッチメント

ロボットに装着する。アタッチメントには push と slope に加えて bridge というパーツを追加する。それぞれ、図 3 で示す部分に対応している。bridge は、壁面から天井への移行と天井から壁面への移行を同時に達成する最小限の構造として考えられたパーツである。壁面から天井への移行の際は、移行するロボットが落下しないように移行させるロボットが支える役割がある。また天井から壁面への移行の際は、移行するロボットが落下しないように、ロボットを下から一時的に支えつつ、そのまま壁面に押し付ける役割がある。push と slope については corobos と同様であり、push は移行するロボットを後方下部から押すためのパーツ、slope は押された際に自身を 90 度回転させるためのパーツである。

壁面から天井への移行では、図 4 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 が 1 直線に並ぶ。
- (2) A が B を押す事により、B が壁面に押し付けられ回転する。
- (3) 壁面への吸着力を失った B を A が支える。
- (4) A が B を天井へ押し付け、B が磁石の力で天井に吸着する。移行が完了し、B は天井で走行する。

また、天井から壁面への移行を図 5 に示す。移行の手順は以下のようである。

- (1) 天井の A, B が 1 直線に並ぶ。
- (2) A が B を押す事により、B が壁面に押し付けられ回転

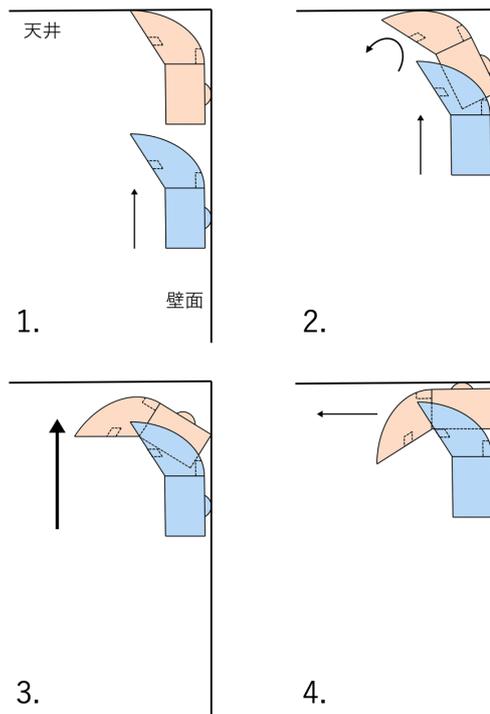


図 4: 壁面から天井への移行方法

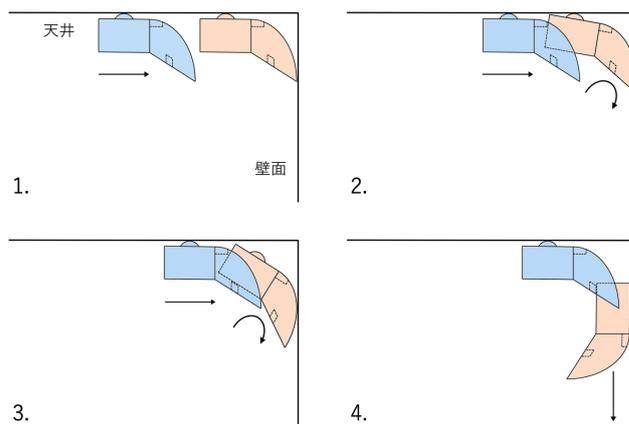


図 5: 天井から壁面への移行方法

する。

- (3) 天井への吸着力を失い、落下しつつ回転する B を A が支える。
- (4) A が B を壁面へ押し付け、B は磁石の力で壁面に吸着する。移行が完了し、B は壁面で走行する。

4. 実装

4.1 使用するロボット

本研究では、ロボットとして toio を使用した。toio は、toio マットと呼ばれる特殊な紙面上に置くことで、マットに印刷された微細なパターンを読み取り自身の位置を制御することができるロボット玩具である。toio は BLE 通信で PC と接続されており、Unity を用いて制御を行った。

また、小型ロボットの壁面や天井への吸着には磁石を

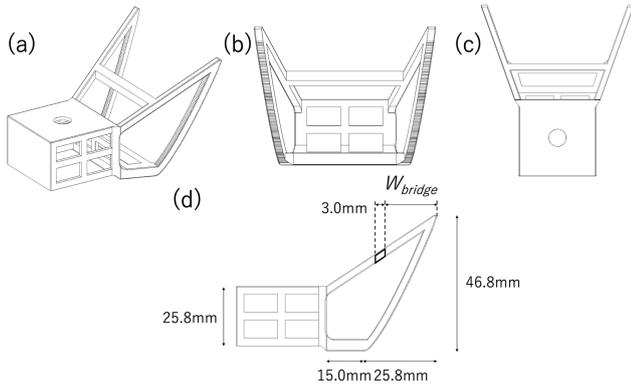
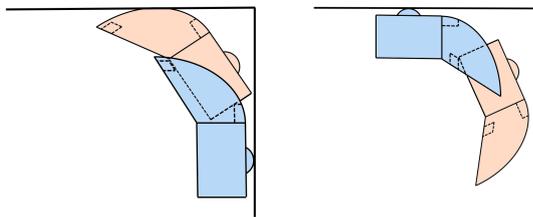


図 6: 作製したアタッチメントの外観とパラメータ: (a) 斜めから見た図 (b) 正面から見た図 (c) 上から見た図 (d) 横から見た図



(a) 壁面から天井への移行時の失敗例 (b) 天井から壁面への移行時の失敗例

図 7: 移行の失敗例

利用することが多い。本研究でも、ホワイトボードに吸着するために、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）を貼り付けた。試行の結果、貼り付け方によって吸着力に大きな差が生じることがわかった。吸着力は強い方が移行率が高いこともわかったため、磁石の位置が地面につかない範囲で出来るだけ低くなるように、厚さ 0.62 mm の厚い両面テープを用いた。またタイヤのグリップを強めるため、toio の 2 輪のタイヤの中心に近い位置に磁石を貼り付けた。

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 6 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。push と slope については corobos と全く同様のパラメータを採用しており、図 6 のようなパラメータとなっている。

そこで本稿では、 w_{bridge} のパラメータの決定について考える。

この bridge は、壁面から天井へ移行する際は、移行させるロボット（以下ロボット A）が移行するロボット（以下ロボット B）を支える役割がある。この際、 w_{bridge} が小さすぎると、天井面に対するロボット B の傾きが大きくなってしまい、天井まで押しつけても天井に吸着しにくくなる（図 7a）。そのため、 w_{bridge} は大きい方が良く考えられる。



図 8: 移行に使用した桌上・壁面・天井

一方で、天井から壁面へ移行する際は、ロボット B を一時的に支えつつ壁面に押し付けることで、ロボット B の落下幅を小さくする役割がある。この際、 w_{bridge} が大きすぎると、ロボット A がロボット B を壁面に押し付けるよりも先に、ロボット B が回転しつつ落下してしまうため、落下幅が大きくなる（図 7b）。そのため、この観点からは w_{bridge} は小さい方が良く考えられる。

そこで、どちらの移行にも適した妥当な w_{bridge} の値を検討するために、 w_{bridge} の異なる複数のアタッチメントを実際に設計し、壁面から天井への移行率・移行時間と、天井から壁面へ移行する際の落下幅について比較実験を行った。実験は、 $w_{bridge} = 21, 22, 23, 24$ mm と bridge なしの従来の corobos の 5 つのアタッチメントに対して行った。なお、いずれの条件においても桌上と壁面との移行は十分スムーズであった。

4.2.1 実験環境

本研究は、図 8 のような環境で行った。桌上、壁面、天井は全てホワイトボードに toio マットを貼り付けたもので構成されている。ホワイトボードは、表面がスチール製のものを使用しており、磁石が吸着する。

また toio マットの表面には、マットのパターンを読み取れる範囲内で薄いラミネート加工を施した。これは、マットの表面を滑らかにすることによって移行をスムーズに行うためである。

4.2.2 壁面から天井への移行実験

実験条件は以下の通りである。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ロボット A がロボット B を押した。押し始めてから 5 秒以内に移行するロボット B が 90 度回転し、天井の座標を認識すれば、移

表 1: 壁面から天井への移行時の移行成功率

w_{bridge} [mm]	移行率 [%]
21	86
22	100
23	100
24	99
bridge なし	0

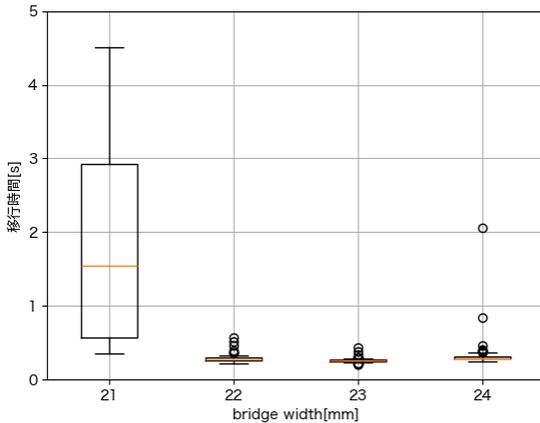


図 9: 壁面から天井への移行時の移行時間

行に成功したと判定し、それ以外を失敗と判定した。移行時間については、ロボット A がロボット B を押し始めてから、ロボット B が天井の座標を認識するまでの時間を測定している。60 fps で実行しているため、誤差は約 0.017 s 程度見込まれる。移行の試行を 100 回行い、移行率を測定した結果を表 1 に示す。移行率について、bridge なしの従来の corobos では、天井への移行は成功しなかった。また、 $w_{bridge} = 21$ mm の条件では、天井面に対するロボット B の傾きが大きく、5 秒以内に天井まで押し切れないケースが散見された。

移行が成功しなかった bridge なしを除いた 4 条件について、移行時間をまとめた結果が図 9 である。

$w_{bridge} = 21, 22, 23, 24$ mm において、移行時間の中央値は 1.54 s, 0.27 s, 0.26 s, 0.29 s であった。 $w_{bridge} = 21$ mm は移行にかかる時間が長く、スムーズな移行ができているとは言えないことがわかる。他の 3 条件間には大きな差は見られなかったが、 $w_{bridge} = 23$ mm の条件が最も移行時間が短かった。

4.2.3 天井から壁面への移行実験

実験条件は以下の通りである。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ロボット A がロボット B を押した。押し始めてから 5 秒以内にロボット B が 90 度回転し、壁面の座標を認識すれば、移行に成功したと判定し、それ以外を失敗と判定した。落下幅について

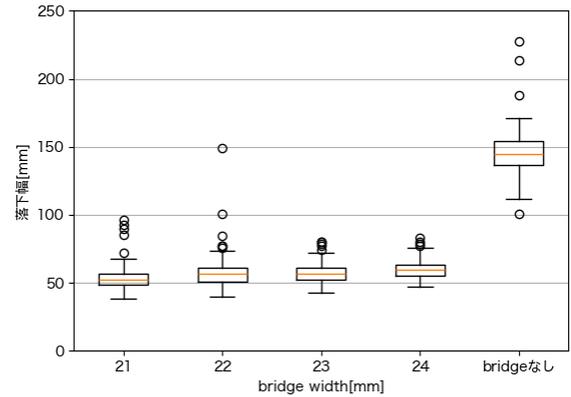


図 10: 天井から壁面への移行時の落下幅

は、天井に接地したまま移行できた場合の座標と壁面に吸着したロボット B が最初に読み取った座標の差を計算し、これを長さに換算している。マットの 1 座標が約 1.38 mm であるため、誤差は約 1.38 mm 程度見込まれる。移行の試行を 100 回行い、落下幅を 5 条件で測定した結果を図 10 に示す。

$w_{bridge} = 21, 22, 23, 24$ mm と bridge なしにおいて落下幅の中央値はそれぞれ 52.44 mm, 56.58 mm, 56.58 mm, 59.34 mm, 144.9 mm であり、 w_{bridge} が小さい方が落下幅の中央値も小さい傾向にあることが確認された。

また、bridge がない場合（従来の corobos）に比べて、bridge がある場合は落下幅が 1/3 程度に抑えられていることがわかる。

以上の実験の結果から、壁面から天井への移行の失敗がなく、その中で落下幅が小さく移行時間も短い $w_{bridge} = 23$ mm が最も適当であると考えられるため、これをアタッチメントのパラメータとして採用した。

5. デモンストレーション

本章では、作製した corobos plus が卓上・壁面・天井を周回する図 11 のようなデモを紹介する。このデモでは、人が任意の面上に置いたロボットが、同一面内の他のロボットを押し、また押されることで移行を行う。実験の結果得られたパラメータで作製されたアタッチメントを使用しており、安定して移行ができるためスムーズにロボットが周回する。どのロボット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。

本デモでは、卓上から左壁面、左壁面から天井、天井から右壁面、右壁面から卓上の 4 つの移行が発生する。そのため、移行が発生する 4 箇所よりも多い、5 台以上のロボットが存在すれば、卓上・壁面・天井を周回することができる。



図 11: 卓上・壁面・天井を周回するデモ: corobos plus は卓上と壁面の間や壁面と天井の間を移行可能であるため、卓上・壁面・天井を周回できる

6. まとめ

本稿では、卓上・壁面・天井の間を移行する群ロボット corobos plus の提案を行った。1 種類のアタッチメントのみで卓上と壁面の移行ができるという corobos の特長を失わないまま、少ないパーツで壁面と天井の間の移行を実現するために、アタッチメントに bridge を追加し、その適正な位置を実験により検討した。その結果、以前の corobos では移行できなかった壁面から天井への移行に 100% 成功するとともに、天井から壁面への移行の際の落下幅も 1/3 程度に抑えることに成功した。そして、人が任意の面上ロボットを配置することで、corobos plus が卓上・壁面・天井を周回するデモを作成した。

今後は、本実装の課題であるアタッチメントの上部に余分なスペースが少なくものが載せにくい問題を解決することや、壁面と壁面間の移行を実現してさらなる移行能力の拡張を行うこと、さらなる corobos plus の活用方法の模索を行うことを考えている。

謝辞 本研究は中山未来ファクトリーの支援および JSPS 科研費 JP21K17778 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Lin, T.-H., Yang, W. Y. and Nakagaki, K.: ThrowIO: Actuated TUIs that Facilitate “Throwing and Catching” Spatial Interaction with Overhanging Mobile Wheeled Robots, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–17 (2023).
- [6] Yu, L., Gao, C., Wu, D. and Nakagaki, K.: AeroRigUI: Actuated TUIs for Spatial Interaction using Rigging Swarm Robots on Ceilings in Everyday Space, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–18 (2023).
- [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] 中川陽介, 韓 燦教, 苗村 健: 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, Vol. 1B-46, pp. 322–327 (2023).
- [9] Han, C., Nakagawa, Y. and Naemura, T.: Demonstrating Swarm Robots Capable of Cooperative Transitioning between Table and Wall, *Adjunct Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–4 (2023).
- [10] iRobot: Programming Robot Root™, <https://edu.irobot.com/jp>, accessed: Dec-18-2022.
- [11] Nguyen, S. T. and La, H. M.: A Climbing Robot for Steel Bridge Inspection, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, Vol. 102, No. 4, pp. 9322–9328 (online), DOI: 10.1007/s10846-020-01266-1 (2021).
- [12] 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).
- [13] Liang, G., Luo, H., Li, M., Qian, H. and Lam, T. L.: FreeBOT: A freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point - Design and implementation, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 6506–6513 (online), DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341129 (2020).
- [14] Sony Interactive Entertainment: Toy Platform toio™, <https://www.sony.com/SonyInfo/design/stories/toio/>, accessed: July-20-2022.