

# 折紙構造を用いた自走式・形態変化パーティションデバイス

村上 聡\* 藤田 和之\* 北村 喜文\*

**概要.** 本研究では、折紙構造と複数台のモバイルロボットを活用したパーティションデバイスである Origami Partition を提案する。本デバイスは、シンプルな制御で、幅、高さ、曲率を含む多形態変化が可能であり、様々なユーザタスクに対応する。また、使用しない時はコンパクトに収納可能であり、輸送と保管が容易である。概念実証プロトタイプとして3形態変化が可能なタチ・ミウラ多面体を2つに分割した折紙構造を持つ卓上スケールのパーティションを実装し、オープンプランオフィスでのいくつかのアプリケーションシナリオを紹介する。

## 1 はじめに

近年、ユーザのニーズを満たす適応的なワークスペースの実現を目指して、動的に再構成可能なパーティションシステムが活発に研究されている。先行研究では、(1) 自走ロボットによる位置制御 [8, 11, 12, 13, 14], (2) ロールスクリーンによる高さ制御 [13, 14], (3) 蛇腹機構による幅・曲率の制御 [8] といった手法が検討されている。しかし、依然として制御可能な空間形状に制限があり、空間設計の自由度が十分に確保されていない。また、多くの形態を実現するためには、システムが大規模かつ複雑になる傾向にあった。

この形態変化のバリエーションとシステムの複雑性のトレードオフを解決するために、我々は折紙構造に着目した。折紙構造は、薄く軽量な材料に強度を付与でき、折りたたまれた状態から少ない操作で3次元構造に展開できるという利点を持つ。これにより、部材や消費電力を抑えながら、ユーザタスクに応じた形状変化が可能なファニチャデバイスが複数提案されてきた [1, 4, 5, 6, 7]。パーティションに折紙構造を取り入れた研究も存在する [8, 19] が、形態変化のバリエーションが限られており、その目的も音響制御や接近しやすさの調整に特化している。そのため、複数のユーザタスクに対応した空間設計をサポートするものは十分に検討されていない。

そこで本研究では、複数台のモバイルロボットと折紙構造を用いることで多形態変化が可能なパーティションデバイスである Origami Partition を提案する。Origami Partition は折紙工学で提案されてきた折紙構造を応用することで、シンプルな制御で、幅、高さ、曲率を含む形態変化を実現し、様々なユーザタスクに対応する。さらに、間仕切り機能利用時以外はコンパクトに折りたたまれるため空間を

占拠せず、輸送や保管が容易である。概念実証プロトタイプとして3形態変化が可能なタチ・ミウラ多面体を2つに分割した折紙構造を持つ卓上スケールのパーティションを実装し、オープンプランオフィスでのいくつかのアプリケーションシナリオを実演することで、折紙構造を用いた形態変化パーティションデバイスの可能性を示す。

## 2 Origami Partition

### 2.1 アーキテクチャ

Origami Partition は、(1) Partition Unit, (2) Control Unit, (3) Stage Unit から構成される。Partition Unit は形態変化可能な折紙構造を備えたパーティション部であり、空間の分割・接続・再構成を行う。折紙構造の持つ自由度に応じて、形態が Control Unit によって制御される。Control Unit はアクチュエータを搭載したモバイルロボットで構成される群ロボットモジュールであり、モバイルロボットの位置・回転制御とアクチュエータの高さ制御により Partition Unit の形態変化を行う。Stage Unit は Control Unit が移動できる空間を定義する。Stage Unit の規模を調整することで、卓上規模から部屋規模のインタラクションを作成できる。

### 2.2 概念実証プロトタイプ

Origami Partition の概念実証プロトタイプとして3形態変化が可能なタチ・ミウラ多面体の折紙構造を持つ卓上スケールのパーティションを実装した。

#### 2.2.1 ハードウェア実装

図1はプロトタイプの Control Unit の設計を示している。Control Unit はリニアアクチュエータと移動機構、3D プリントされたパーツで構成される高さ 130mm 横 90mm 縦 105mm の直方体のモバイルロボットである。

リニアアクチュエータとして、本プロトタイプでは (1) 高い収縮率、(2) 十分な変形速度、(3) 適度な

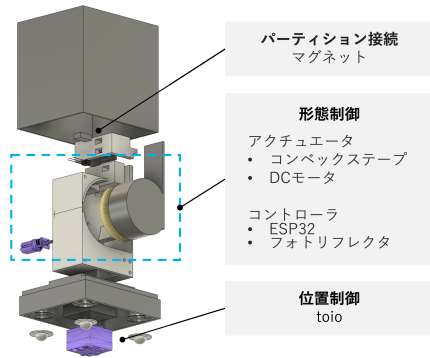
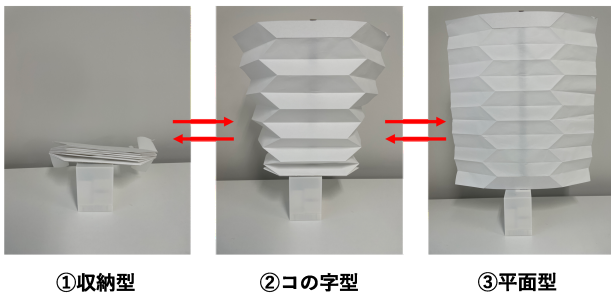


図 1. 卓上スケールプロトタイプ of Control Unit



①収納型 ②コの字型 ③平面型

図 2. 卓上スケールプロトタイプ of 3 形態変化

出力を持つ、コンベックステープを用いたリールアクチュエータ [3, 9, 17, 18] を採用した。コンベックステープ (Komelon, MAG JACKET 25mm × 5.5m) は DC モータ (Pololu 1000:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 6V) の回転によって制御され、長さを自由に調整できる。先行研究 [17] と同様に、コンベックステープ上に 10mm 幅で白と黒が交互に印刷された紙テープを貼り付け、フォトリフレクタ (LBR-127HLD) で明度の変化を計測することでコンベックステープの高さを取得している。

移動機構として市販のモバイルロボット (Sony, toio[2]) を使用している。toio は、内蔵カメラを使用して、後に紹介する開発用プレイマット上に印刷されたパターンを読み取ることでマット上の x 座標と y 座標を取得することができる。

Partition Unit は幅 520mm 高さ 600mm の模造紙を折り作成した。マグネットを模造紙の中央部両端に固定しており、Control Unit に接続できる。1 自由度の折紙構造であるタチミウラ多面体 [10, 16] を 2 つに分割したものを採用しており、Control Unit を通じて、構造中の 1 点を変形させることで全体が連動して変形し、収納型からコの字型、平面型の 3 形態を連続的に変化することができる (図 2)。

また、Stage Unit として toio™ 開発用 A3 プレイマット [15] を 4 枚敷き詰めた縦 594mm 横 840mm の卓上サイズのステージを作成した。

## 2.2.2 ソフトウェア実装

パーティションの位置制御と形態変化制御が可能な GUI ソフトウェアを開発した (図 3)。このソフトウェアは、Unity (Ver: 2022.3.9f1) を使用して構築されており、ユーザがパーティションの物理的な動作をリアルタイムで視覚的に確認しながら、複数の制御方法を利用してパーティションを操作することができる。

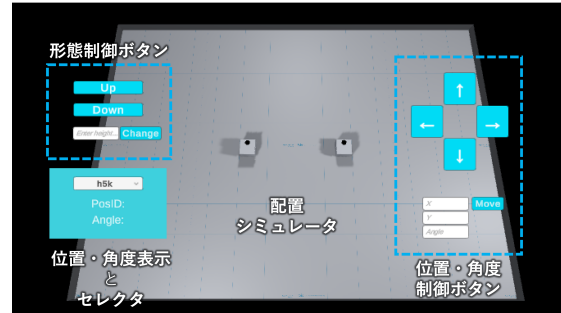


図 3. 位置制御と形態変化制御が可能な GUI

## 3 アプリケーション

Origami Partition がオフィスにおいてどのように利用できるのかを示すいくつかのアプリケーションシナリオについて説明する。

### 3.1 机の分割

Origami Partition は、3 形態変化と位置制御を利用して、机の広さや形状、ユーザタスクに応じて机を柔軟に仕切ることができる。平面形態のパーティションで机を分割したり、コの字型の形態のパーティションを二つ並べることで三面鏡型の仕切りを作成することが可能である。

### 3.2 行動の制御

Origami Partition は、卓上の危険な物や壊れやすい物にユーザが誤って触れないように、動的な囲いを形成できる。日常のデスクワークでは、飲み物を置いたカップや電子機器など、注意を払わなければならない物が机の上に置かれることが多い。例えば、誤って手が当たってコーヒーカップが倒れると、火傷をしたり、コーヒーをこぼしたりする危険がある。Origami Partition が自動的にカップを囲むことで、このような事故を防ぐことができる。

もう 1 つのユースケースとして、利用者のプライバシー保護が挙げられる。ユーザが机を一時的に離れた時に、プライベートな情報が記載された書類や PC の画面を他人に覗かれることは、プライバシーの観点から問題となる。Origami Partition が自動的に PC の画面や書類を覆い隠すことで、利用者のプライバシーを守ることができる。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 (21K11974) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] C. Eisenbarth, W. Haase, Y. Klett, L. Blandini, and W. Sobek. PAOSS: Pneumatically actuated origami sun shading. *Journal of Facade Design and Engineering*, 9(1):147–162, 2021.
- [2] S. I. Entertainment. 小さなキューブ型ロボット トイ・toio (トイオ) . <https://toio.io/>. Retrieved September 6, 2024.
- [3] R. Gomi, K. Takashima, K. Fujita, and Y. Kitamura. A Triangular Actuating Device Stand that Dynamically Adjusts Mobile Screen’s Position. In *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–4, 2022.
- [4] J. T. Gonzalez, S. Prashant, S. Tayal, J. Kedia, A. Ion, and S. E. Hudson. Constraint-Driven Robotic Surfaces, At Human-Scale. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST ’23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [5] J. E. Grønbaek, M. K. Rasmussen, K. Halskov, and M. G. Petersen. KirigamiTable: Designing for proxemic transitions with a shape-changing tabletop. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–15, 2020.
- [6] M. Huynh, J. Althaus, and H. Kim. Tidal Space: Interactive Home Installation for Work-From-Home Parents. In *SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2022.
- [7] S. S. Kwak, S. Park, D. Kang, H. Lee, J. H. Yang, Y. Lim, and K. Song. PopupBot, a Robotic Pop-up Space for Children: Origami-based Transformable Robotic Playhouse Recognizing Children’s Intention. In *Proceedings of the 2022 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, HRI ’22*, p. 1196–1197. IEEE Press, 2022.
- [8] H. Lee, Y. Kim, and M.-s. Kim. Come on in!: a strategic way to intend approachability to a space by using motions of a robotic partition. In *2013 IEEE RO-MAN*, pp. 441–446. IEEE, 2013.
- [9] A. Matsuda, T. Miyaki, and J. Rekimoto. ScalableBody: a telepresence robot that supports face position matching using a vertical actuator. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, pp. 1–9, 2017.
- [10] K. Miura and T. Tachi. Synthesis of rigid-foldable cylindrical polyhedra. *Symmetry: Art and Science*, 2010:204–213, 2010.
- [11] B. V. D. Nguyen, J. Han, and A. Vande Moere. Towards Responsive Architecture that Mediates Place: Recommendations on How and When an Autonomously Moving Robotic Wall Should Adapt a Spatial Layout. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 6(CSCW2), nov 2022.
- [12] B. V. D. Nguyen and A. Vande Moere. The Adaptive Architectural Layout: How the Control of a Semi-Autonomous Mobile Robotic Partition was Shared to Mediate the Environmental Demands and Resources of an Open-Plan Office. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–20, 2024.
- [13] Y. Onishi, K. Takashima, K. Fujita, and Y. Kitamura. Self-actuated stretchable partitions for dynamically creating secure workplaces. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–6, 2021.
- [14] Y. Onishi, K. Takashima, S. Higashiyama, K. Fujita, and Y. Kitamura. Waddlewalls: Room-scale interactive partitioning system using a swarm of robotic partitions. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–15, 2022.
- [15] SwitchScience. toio™ 開発用 A3 プレイマット. <https://www.switch-science.com/products/6650/>. Retrieved September 6, 2024.
- [16] T. Tachi and K. Miura. Rigid-foldable cylinders and cells. *Journal of the international association for shell and spatial structures*, 53(4):217–226, 2012.
- [17] S. Takei, M. Iida, and T. Naemura. Kinereels: extension actuators for dynamic 3d shape. In *ACM SIGGRAPH 2011 Posters*, pp. 1–1. 2011.
- [18] K. Tanaka, H. Yokoyama, H. Ishii, S. Inoue, Q. Shi, S. Okabayashi, Y. Sugahara, and A. Takanishi. Novel extendable arm structure using convex tapes for improving strength of pipe on tiny mobile robots. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 637–642, 2016.
- [19] S. Vyzoviti and N. Remy. Acoustically Efficient Origami Based Partitions for Open Plan Spaces. In *Proc. eCAADe*, 2014.

## 未来ビジョン

本デモでは、卓上スケールのプロトタイプを紹介したが、現在、ルームスケールのプロトタイプの開発を進めている。これにより、オフィス全体や部屋単位でのダイナミックな空間の構成が可能になる。

また、現状では折紙の形態制御にリールアクチュエータのみを使用しているが、今後は複数のモバイルロボットの協調動作を組み合わせる予定である。これにより、多自由度折紙構造など制御可能な折紙構造の種類が増え、より複雑な形状かつ複数の形態変化を備えた空間の探索が可能になる。

さらに、現行システムでは床や卓上での展開に限られているが、将来的には、強磁性材料やレールシステムを活用することで、壁や天井

にもパーティションを展開できるようにする計画である。これにより、柔軟に空間を構成し、ユーザの周囲全体をカバーする動的な空間環境を実現したいと考えている。

