

小型ロボットとテクスチャの組み合わせによる 情報提示の探索

家山 剣¹ 塚田 浩二¹

受付日 2025年2月28日, 採録日 2025年11月11日

概要: 近年, 複数台の小型ロボットを用いることで生活空間においてユーザをサポートする研究が行われているが, 筐体サイズ等の制約で拡張性に欠ける課題があった. そこで本研究では, 複雑な機構や制御を必要としないテクスチャに着目し, 複数台の小型ロボットと交換可能なテクスチャを組み合わせた情報提示手法を提案する. 次に, 小型ロボットとテクスチャのデジタルツインを仮想空間上に作成し, 例示プログラミングを用いて小型ロボットの形状や動きを調整/探索可能な支援ツールを構築する. さらに, 本システムを用いた性能評価とワークショップを通して, 基本的な性能や課題, 応用可能性を議論する.

キーワード: 小型ロボット, テクスチャ, 情報提示, 例示プログラミング

Exploring Information Presentation by Combining Small Robots and Textures

TSURUGI IEYAMA¹ KOJI TSUKADA¹

Received: February 28, 2025, Accepted: November 11, 2025

Abstract: In recent years, research has been conducted on the use of multiple small robots to support users in their living spaces, but the system lacks scalability due to limitations such as the small size of the chassis. In this study, we focus on textures that do not require complex mechanisms or control, and propose an information presentation method that combines multiple small robots and exchangeable textures. Next, we create a digital twin of small robots and textures in a virtual space, and develop a support tool that enables adjustment and exploration of the textures and movement of small robots using programming by example. We verify the performance of the system through performance evaluation, and explore potential applications through workshops.

Keywords: Small Robots, Textures, Information Presentation, Programming by Example

1. 背景

近年, 複数台の小型ロボットが役割分担や協調動作をすることで, ユーザの日常生活をサポートする研究 [1][2][3][4][5][6][7][8] が盛んに行われている. 小型ロボットは, 機等の限られたスペースで活動したり複数台が協調動作をして複雑なタスクを達成できる特徴がある. 例えば, Zooids[2] では, 多数の小型群ロボットを用いてグラフの可視化を行ったり, スマートフォン等を運搬するよう

な事例を提案している. ShapeBots[1] では上下/左右等に伸長可能な機構を備えた複数台の小型ロボットを用いて, 地図上へのデータの可視化/机上のゴミを移動して作業スペース作成/飲み物の飲み頃を伝えるタイマー等の多様な応用例が示されている. HERMITS[3] では, 小型ロボットを用いた人形劇等のエンターテインメント的な応用例も提案されている. こうした事例では, 一見実用的に見えるものも含めて, 「小型ロボットが協調して動き回る可愛らしさ」がその魅力の一つであり, 表現手法としてエンターテインメント要素を備えていると考える. その反面, 筐体が小さく複雑な機構や多数のセンサ/アクチュエータの搭載

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido, 041-8655,
Japan

が困難であり、拡張性に欠ける問題があった。そこで本研究では、交換可能なテクスチャと小型ロボットを組み合わせることで、複雑な制御や機構を利用せずに表現や応用の幅を広げる仕組みを提案する(図1)。これまでに触り等を制御可能なテクスチャを3Dプリンタで造形する手法[9]や空気圧制御を用いたテクスチャをロボットに付与する試み[10][11]が提案されてきた。しかし小型ロボットが複数のテクスチャを使い分けてユーザに情報を提示するような研究は、あまり行われてこなかった。

次に、開発者以外のユーザを巻き込んで応用例の探索を行うために、動作探索ツールを実装する。小型ロボットとテクスチャの簡易的なデジタルツインを仮想空間上に作成し、例示プログラミングのような手法で小型ロボットの形状や動きを調整/シミュレーションする。例えば現実空間のロボットを動かして軌跡を記録し、仮想空間上のロボットを同期して動かし、仮想空間内でロボットの動きを調整して現実空間の動きに反映できる。さらに、動作探索ツールを用いたワークショップを通して、ユーザに自由に作品を制作させた上でテクスチャ/動作の活用方法を分析し、小型ロボットとテクスチャを組み合わせた表現の効果を検証する。最後に、制作された作品に基づいて、将来必要なインタラクション機能や適切な実装方式を整理する。

なお、本論文は EC2023 での発表 [12] と、インタラクション 2025 でのデモ発表 [13] / HCI 研究会での発表 [14] を統合/整理した上で、関連研究/実装/議論等を加筆した。

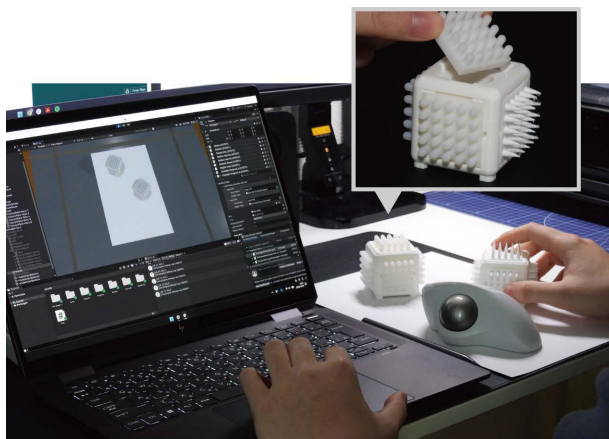


図1 本システムの利用例

Fig. 1 Example of system usage.

2. 関連研究

本研究に関連する研究事例を、5つの分野から説明する。

2.1 小型ロボットを活用したインタラクション研究

卓上で複数台の小型ロボットを用いて、情報提示やユーザの生活を支援するインタラクション研究が行われてき

た。ここでは、(1) 小型ロボットのみを利用する研究、(2) 小型ロボットと独自ハードウェアを組み合わせる研究、(3) 小型ロボットと VR/AR を組み合わせる研究の3点から紹介する。(1) について、Le ら [2] は、群ロボットを用いたユーザインタフェース「Zooids」を提案した。小型ロボットを無線通信で制御し、プロジェクタで投射したパターンをロボット搭載の光センサで検出することで位置を検出する。Kim ら [6] は、Zooids を活用してユーザに触覚フィードバックを与える「SwarmHaptics」を提案した。小型ロボットがユーザの手や腕に接触し、振動パターンを提示することで触覚ディスプレイとして利用できる。Dementyev ら [8] は、衣服上で動作可能な複数台の小型ロボットである「Rovables」を提案した。ロボットの車輪には磁石が内蔵されており、布を挟むことで衣服上を自由に移動できる。Wang ら [15] は、複数台の小型ロボットが自律的に協調して、卓上のモノを移動可能なシステム「Push-That-There」を提案した。ユーザが GUI / ジェスチャ / 音声等でモノの移動方法を指定するだけで、ロボットの制御アルゴリズムはシステムで自動生成される点が特徴である。(2) について、小型ロボットに独自ハードウェアを組み合わせることでその機能/応用を拡張するシステムが提案されている。Suzuki ら [1] は、上下/左右等に伸長可能な機構を制御可能な複数台の小型ロボットを用いて、データの可視化や日常生活のサポートをするシステム「ShapeBots」を提案した。Nakagaki ら [3] は、「メカニカルシェル」と呼ばれるアタッチメントを小型ロボットに装着することで入出力機能を拡張し、物理的な機構のみで多様な動きや入力を行う「HERMITS」を提案した。Li ら [5] は、オンライン学習の指導場面で、教師と生徒のコミュニケーションを円滑にするため、ディスプレイやカメラを搭載した群ロボットを操縦して自由に視点を切り替え可能なテレプレゼンスシステム ASTEROIDS を提案した。(3) について、小型ロボットを VR / MR 環境での入力/フィードバックに活用するインタラクション研究が行われている。Zhao ら [7] は、仮想現実内に登場するオブジェクトに合わせて、磁石を内蔵したキューブ状の小型群ロボットを移動/合体することで目的の形状に組み立てて入力インタフェース等に利用する手法を提案した。Suzuki ら [4] は、向きと高さを変化させながら移動できる群ロボットを用いて、VR 内の物体の位置や表面の質感をユーザが触覚で知覚できるシステム「HapticBots」を提案した。Ihara ら [16] は、小型ロボットと透過型 HMD を組み合わせたテレプレゼンスシステムを提案した。遠隔地での協調作業を想定して、物体を同期してロボットで移動させたり、手が接触する感覚をロボットで表現する等の応用例を示している。

このように、小型ロボット単体で可能な活用場面は限定されるため、独自ハードウェアや VR / MR でその機能を補助するような研究が行われてきた。本研究のアプローチ

は (2) に属するものであり、電気的な制御や複雑な機構を必要とせず、複数台の小型ロボットの動きとテクスチャ形状の組み合わせだけで情報提示の拡張を試みる点に独自性がある。

2.2 多様な質感や機能を持つテクスチャを造形する研究

Ion ら [9] は、2 つ以上の形状を遷移でき、3D プリンタで造形可能な「Metamaterial Textures」を提案した。例えば、ドアノブを対象としたプロトタイプでは、調節ダイヤルを回すことでテクスチャを平坦な形状から棘が並んだ形状に遷移させ、部屋に入ってほしくない等の情報を提示できる。荒井ら [17] は、3D プリンタに物理的な振動を与えてテクスチャを生成する手法を提案した。熱溶解積層方式 3D プリンタのビルドプレートに振動スピーカを取り付け、音を再生しながら造形を行った。Sakura ら [18] は、3D プリントが可能である柔軟な導電材料で内部格子構造を造形し、その変形を検出するソフトセンサ「3D-Printed Soft Sensors」を提案した。造形物に接続した電極間の抵抗値から変形の度合いを検出することで、様々なアプリケーションを示した。

本研究では、一般的な家庭用 3D プリンタで造形可能なシンプルなテクスチャを中心として、小型ロボットと組み合わせている。将来的には、これらの研究のような特殊な構造を付与したテクスチャを利用することで、インタラクションや表現力を拡張できる可能性がある。

2.3 表面形状とロボットを組み合わせた研究

Hu ら [11] は、視覚障がい者と健常者の子供が混在するグループ活動において、コミュニケーションを円滑にするロボットプラットフォーム「Touchibo」を提案した。これには、空気圧で動的に形状変化するテクスチャ・香り・音・光の情報を提示する機能が組み込まれている。提案されたロボットでストーリーテリングの活動をサポートし、子供たちの会話を補助する応用例を提案した。Hu ら [10] は、空気圧で形状変化させることでロボットの感情を表現するロボットスキン「GOOSEBUMPS」を提案した。既存のロボットは、コミュニケーションをとる際に、身振りや表情を使うことが多かったが、動物の皮膚の変化（鳥肌・逆立つ毛・フグの針等）をモチーフに感情を表現している。

本研究では、小型ロボットと交換可能なテクスチャを組み合わせたシステムを作成し、動きと形状の組み合わせを変化させることで異なる刺激をユーザに与えることができる。

2.4 例示プログラミングを用いてデバイスを制御する研究

Nakayama ら [19] は、ソフトロボットの動きや振る舞いを容易にデザインできる「MorphIO」を提案した。空気圧駆動の柔らかい筐体の内部にスポンジセンサを組むこと

で、ユーザのソフトロボットに対する動作や変形を記録／再生できる。Hayes ら [20] は、サーボモータ・スイッチ・制御基板とジョイントを持った複数のパーツを接続して立体的なオブジェクトを組み立てることができる「Topobo」を提案した。接続部分のサーボモータを手動で回転させることで、ロボットに動きを記録させて繰り返し再生することができる。Nakagaki ら [21] は、線形の形状変化インタフェース「LineFORM」を提案した。内部に複数のサーボモータとセンサが直列に内蔵されており、自己の形状を自在に変化させることができる。例示プログラミングを使った応用例では、デバイスを装着した状態で身体的動作を記録／再生し、他の人に動きを教えることができる。

本研究では、例示プログラミング手法を取り入れ、テクスチャと小型ロボットを組み合わせた情報提示手法の活用方法を探求する。

2.5 机上での手／モノの認識手法

テーブルトップインタフェースやインタラクティブサーフェスの研究分野では、スクリーン上（机上／壁面上）での手やモノを検出するための研究が古くから提案されてきた。代表的な方式としては、スクリーン上方にカメラを設置して手指の位置／形状を認識する方式 [22] や、赤外線を投光しスクリーン下方に赤外線カメラを検出して手指やモノの接触／近接を認識する方式 [23][24]、スクリーンに格子状に張り巡らせたアンテナを用いて静電容量の変化から手指やモノ（導電体）の接触／近接を検出する方式 [25] 等が提案されている。また、静電容量方式では人の手指が離れた状態でもモノの検出ができる手法 [26] も提案されている。

本研究では、ロボットの動きは toio と専用プレイマットを用いて絶対座標を検出しているが、それ以外の手やモノの検出システムは実装していない。認識手法については制限を加えずにワークショップ等で応用例を探索した上で、その作例を踏まえて追加すべきインタラクションやその実現方法を、先行技術を踏まえて詳しく議論する。

3. 提案

本研究では、複数台の小型ロボットに交換可能なテクスチャを付与し、それらを物理的に駆動することにより、ユーザに触覚／視覚的な刺激を与えることで情報提示を行う。また、小型ロボットの動作を制御することで、刺激に用いるテクスチャを切り替えたり、突く／擦るといった動作のパラメータを変化させることができる。これにより、「ロボットがユーザの注意を適度に引き付ける」「動きやテクスチャを変更することで注意の引き方やロボットへの印象が変化する」といった効果があると考えた。図 2 に本システムで調整可能なパラメータの例を示す。例えば、テクスチャ配置については、小型ロボットの周囲 4 面に異なる

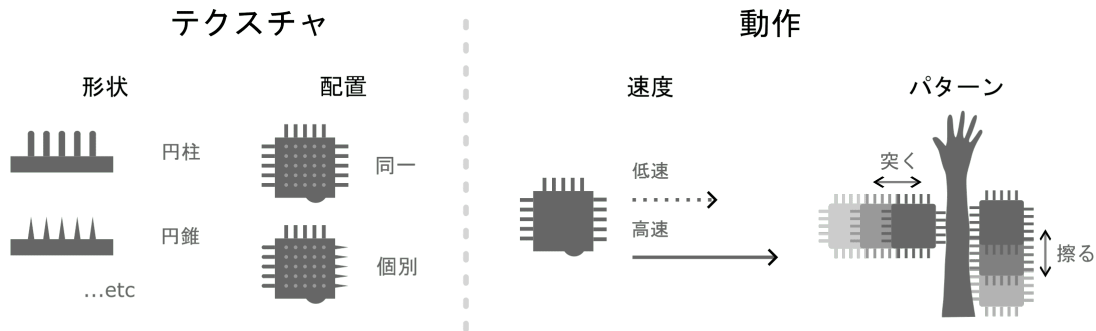


図 2 基本システムで変更可能なパラメータ例

Fig. 2 Examples of parameters modifiable in the system.

テクスチャを装着すれば、本体を回転させることで任意のテクスチャで触覚刺激を与えることができる。一方、全てに同じテクスチャを装着することで全体の視覚的印象を統一できる。動作パターンについては、ユーザの手や腕に触覚刺激を与える際に反復的／継続的に刺激を提示可能な動きとして、ロボットの前後移動を用いた「突く（つつくような動作）」と、並行移動を用いた「擦る（なでるような動作）」という動き等が考えられる。

基本システムの構成図を図 3 に示す。本システムでは、小型キューブロボットの toio、制御用ホストコンピュータ、3D プリンタで造形されたテクスチャプレート、テクスチャプレートを toio に固定するためのテクスチャマウントから構成されている。これらを組み合わせてユーザに情報提示を行う。

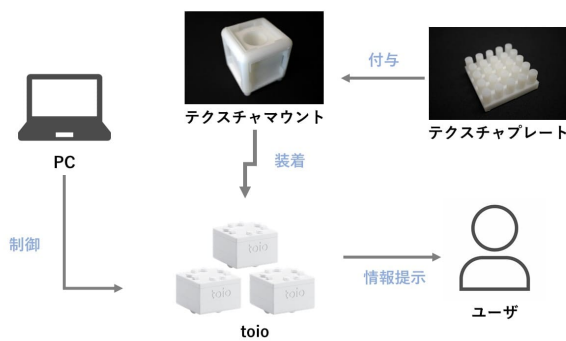


図 3 基本システム構成

Fig. 3 Basic system configuration.

さらに、応用例の探索を支援するために、動作探索ツールを構築する。小型ロボットとテクスチャのデジタルツインを仮想空間上に作成し、例示プログラミングのような手法で小型ロボットの形状や動きを記録／調整／再生可能な支援ツールを構築する（図 4）。

4. 実装

本研究では、SONY が販売する小型キューブロボット



図 4 動作探索ツールの概要

Fig. 4 Overview of the motion exploration tool.

の toio を利用した。toio と開発環境について説明した後、テクスチャマウントとテクスチャプレートについて紹介する。最後に、動作探索ツールの実装について説明する。

4.1 基本システム

4.1.1 toio と開発環境

toio^{*1}とは、SONY から発売されている小型キューブロボットである。本システムでは、この toio を複数台用意して、物理的に駆動することでユーザに情報提示を行う。

toio は、31.8mm×31.8mm×24.3mm の小さなキューブ形状で、2つの車輪が内蔵されている。何も載せない状態で、最大 350mm/sec の直進、1500° /sec の回転が可能で、PC から BLE 経由で無線制御できる。また、キューブ上面に様々なオブジェクトを載せる想定で設計されており、200g の重量まで積載して走行できる。付属のプレイマットには、表面に特殊なパターンが印字されている。キューブ裏面に読み取りセンサが内蔵されており、リアルタイムに絶対位置の検出が可能である。これにより、指定座標への移動や協調動作などの複雑な制御が容易にできる。このように、小型で十分な移動性能と積載重量を持ち、絶対位置センサを内蔵して無線で制御できることから、toio を用いてプロトタイプの構築をすることにした。

^{*1} <https://toio.io/about.html>

本研究では、複数台の toio とホストコンピュータを BLE 通信を介して制御する。複数の開発環境があるが、本システムではシミュレータを使って動作探索ツールの実装を進めることから PC (HP Spectre x360 14-eu0007TU, Windows 11 Pro) と Unity による開発環境を主に利用する。本システムの開発環境として、“Unity 2022.3.44f1 LTS” を使用した。toio の制御には、“toio SDK for Unity v1.6”^{*2} を使用し、Visual Studio を用いて C# でプログラムを記述した。

4.2 テクスチャマウント

テクスチャマウントとは、toio にテクスチャプレートを設置するための拡張部品のことを指す (図 5)。toio をテクスチャマウント底面の窪みに差し込み、被せるようにして利用する。テクスチャマウントの造形には、3D プリンタ (Ender-3 V2 Neo) を使用し、フィラメント素材には、造形時の反りによって発生する寸法誤差が生じにくい PLA 樹脂 (PolyMax PLA White) を使用した。

toio とテクスチャマウントとの間のクリアランスは約 0.4mm に設定しており、toio を奥まで押し込むと全体が覆われ固定される。また、toio をテクスチャマウントから取り外す際には、上面に設けた穴から指や棒で押し出すことで簡単に取り外せる設計にした。側面と上面を合わせた計 5 面には、テクスチャプレートを嵌め込むための窪みを用意した。窪みの両端に小さな凹みを付けたり、外周に隙間を作って板バネの役割を持たせることで、テクスチャプレートが安定して固定／取り外しできるように工夫した。

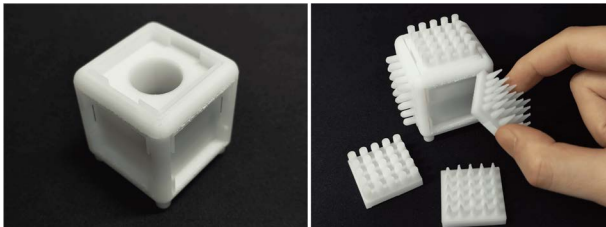


図 5 テクスチャマウントとプレートの装着例

Fig. 5 Examples of enclosure and texture plate installation.

4.3 テクスチャプレート

テクスチャプレートとは、様々なテクスチャ形状を備えたプレート状のアタッチメントであり、テクスチャマウントに装着して利用する。触覚刺激を与えるテクスチャ 2 種 (基本テクスチャ、柔軟テクスチャ) と、視覚刺激を与えるテクスチャ 1 種 (ミラーテクスチャ) を実装した。テクスチャプレートは、3D プリンタ (Zortrax M200, Ender-3 V2 Neo, Kingroon KP3S) を用いて造形した。プレート部分の寸法は、全て 31.8mm×31.8mm×5mm に統一し、モデリングの簡易化や 3D プリンタによる造形の安定化、互換

性の確保に配慮した。

4.3.1 基本テクスチャ

基本テクスチャでは、形状が異なる柱をプレート上に等間隔に 5×5 で配置した (図 6)。フィラメント素材には PLA 樹脂を用いた。柱の形状として、先端が平らな円柱 (平円柱)・先端が丸まった円柱 (丸円柱)・円錐の 3 種類を用意した。平円柱を基本形として、丸円柱を温和的 (弱く注意を引く)、円錐を攻撃的 (強く注意を引く) といった印象を与える意図で作成した。

柱の本数は、事前に 1×1, 3×3, 5×5, 7×7 まで造形して適切な密度を検証した。7×7 では、柱が細く簡単に破損してしまう問題があり、1×1 から 3×3 では、目が粗く接触時にテクスチャの質感を感じにくい問題があったため、5×5 を基本形として採用した。

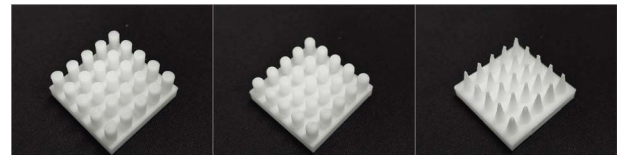


図 6 基本的なテクスチャ (平円柱・丸円柱・円錐)

Fig. 6 Basic textures (flat cylinder / round cylinder / cone).

4.3.2 柔軟テクスチャ

フレキシブルフィラメントを使用した柔軟テクスチャについて述べる (図 7)。柔軟テクスチャは、ユーザの手等への接触時に基本テクスチャよりも弱い刺激を与える (弱く注意を引く) 意図で設計した。

フィラメントとして TPU 樹脂 (PolyFlex TPU90 White) を利用した。柱の根元に向かうにつれて細くなるようにモデル形状を工夫することで、手指などに接触した際に柱が折れ曲がって、より柔軟な感触を提供するように工夫した。TPU 素材の特性上、糸引きや造形中にノズルが柱に物理的に干渉して形状が不安定になる問題があったため、ノズル径を 0.4mm から 0.2mm に変更したり、リトラクション^{*3}の値を上げる等の配慮をした。後処理として、造形物に熱を加えて糸引きを除去した。

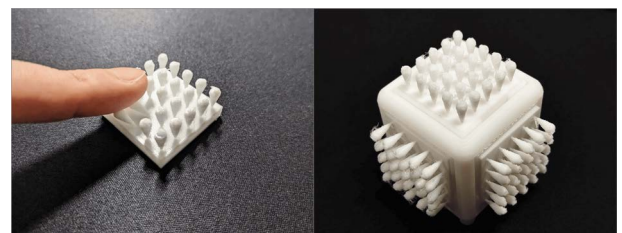


図 7 フレキシブルフィラメントで造形したテクスチャ

Fig. 7 Textures created with flexible filament.

^{*2} <https://github.com/morikatron/toio-sdk-for-unity/>

^{*3} ノズル移動時にフィラメントをエクストルーダ内に引き戻す機能

4.3.3 ミラーテクスチャ

視覚的な刺激を与えるミラーテクスチャについて述べる(図8)．基本テクスチャ／柔軟テクスチャは触覚刺激を中心に設計していたが、システムの予備的な運用を経て、ロボットが直接手等に触れなくても、周辺視野内で動くことでユーザの注意を引く可能性を見出したため、視覚刺激を強調するために実装した．

PLA 樹脂でプレート上に斜面を造形した後に、接着剤を使ってミラーシールを張り付けた．ミラーテクスチャを備えた小型ロボットが特定の場所を反復的に移動／回転することで、環境光を反射してユーザの注意を引く／散らす等の視覚的効果が期待できる．反射面の角度／大きさを調整することで、反射面を揃えて特定の角度にやや強く光を反射したり、反射面をバラバラにして光を乱反射させて移動時にチラチラ輝くような表現ができる．例えば、重要なメモ書きや特定のオブジェクトにスポットライトを当てるようにして目立たせたり、望ましくない作業を邪魔するためにロボットが反射光を使ってユーザの注意を逸らすような応用例が考えられる．

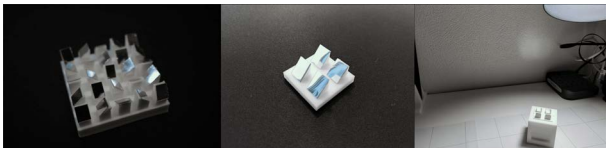


図8 ミラーテクスチャの外観／反射光が壁に投影される様子
Fig. 8 Mirror textures and reflection projected onto wall.

4.4 動作探索ツール

動作探索ツールは、ワークショップ等を通して、開発者以外のユーザに応用例の探索を行ってもらうことを目的に実装した．主に、デジタルツイン機能と例示プログラミング機能から構成される．本研究におけるデジタルツイン機能とは、現実世界の小型ロボットの絶対位置や向きを検出し、仮想世界にリアルタイムで反映させる機能である．さらに、本研究で利用しているテクスチャマウント／テクスチャプレート等の3Dモデルをアセットに取り込み、シミュレータ上で交換できる．この機能により、仮想世界のロボットの外観を実世界と揃えることができる．

またロボットの動きを手軽に設計する手段として、例示プログラミング機能を開発した(図9)．記録開始後、現実空間／仮想空間のプレイマット上でロボットを移動させることで、移動軌跡を随時記録できる．記録終了後に再生を開始することで記録した軌跡に沿って小型ロボットが移動する．記録状態では、複数台の小型ロボットの軌跡を全て記録しており、再生すると一度に複数のロボットを移動させることができる．

4.1節で述べたように、toioは専用のプレイマットを組み

合わせることで、ロボット下部のカメラで絶対座標を計測できる．また、絶対座標を指定することで、現在位置からの差分を自動的に計算してロボットを移動する機能を備える．一方、例示プログラミングを実現するためには、ユーザがロボットを手で移動させる間、連続的に絶対座標を記録し続ける必要がある．秒間平均50回程の座標が記録されるため、再生時に単純に全ての移動処理を行うと、ロボットがガガッと引っかかるような動きをしたり、動作が不安定になる問題があった．そこで、動作を安定化させるため、2種類のデータ処理を実装した．まず、ユーザの手振れや突発的なノイズを軽減するために、移動平均を用いた平滑化処理を行った．次に、記録された座標データをサンプル間の距離が概ね一定になるように間引くことで、再生時のデータ数を秒間平均5回程度に削減した．具体的には、ロボットの移動距離を累計し、一定距離(閾値)を超えた場所を次の目標座標として設定する処理を行った．さらに、再生時には、ロボットの動きを常時監視し、目標座標から一定の閾値(距離)まで移動すると到達とみなし、次の目標座標への移動を開始する機能を実装した．この際、閾値を厳しくし過ぎると目標座標を取りこぼして動作が不安定になるため、予備的な実験を経て半径1.5cm程度に設定した．なお、閾値はシミュレータ上からGUIで手軽に調整できるように配慮した．

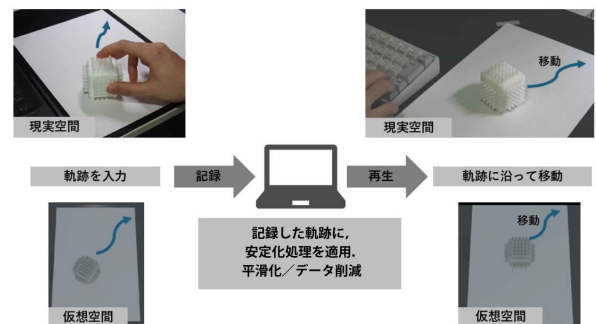


図9 例示プログラミングによる移動軌跡の記録と再生
Fig. 9 Recording and playback of movement trajectories via programming by examples.

5. 応用例

ここでは、開発者自身が試作した応用例を3つ紹介する．

1つ目の応用例として、段階的に刺激を変化させるタイマーを示す(図10)．あらかじめ決められた時間になると小型ロボットがユーザの腕に向かって移動する．最初は、なだらかなテクスチャで優しく刺激を与えるが、時間が経過するにつれて徐々に鋭いテクスチャで激しく刺激を与えるようになる．

2つ目の応用例として、ゲームのやり過ぎを防止し、作業を促す場面の利用イメージを想定した(図11)．小型ロ

ポットが尖ったテクスチャをユーザに向け首を振るようにして、ゲームコントローラに伸ばす手を妨げた後、片方の小型ロボットが丸まったテクスチャを向けて、机に置かれているペンをユーザの手元へ運び作業を促すアプリケーションを実装した。この例では、テクスチャの形状から受け取る印象と小型ロボットの動きの仕草を活用した情報提示を狙った。

3つ目の応用例として、食事中に机に肘をついて食事をしている際に、バッドマナーを注意するような利用イメージを想定した(図12)。ユーザが肘をついて食事を始めると、2台の小型ロボットが尖ったテクスチャで交互に突き始め、最後に肘を机から離すように押しのけるような動作をする。その後、机の縁に上面が尖ったテクスチャを備えた小型ロボットが待機することで、再び肘を突くことを防止する役割も担う。このように、小型ロボットの動作やテクスチャの尖った形状でユーザに食事中のマナーについて意識させることを狙っている。

なお、2.5節で述べたように、現在のシステムでは小型ロボットの位置認識のみを行っており、その他のモノ/手の認識については実装していない。この点については、8.1節で実現方法等を詳しく議論する。

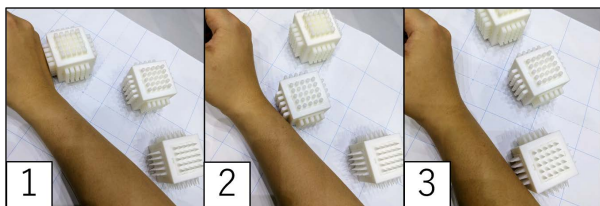


図 10 応用例 1: 刺激が変化するタイマー

Fig. 10 Application 1: Timer gradually changing the stimulus.

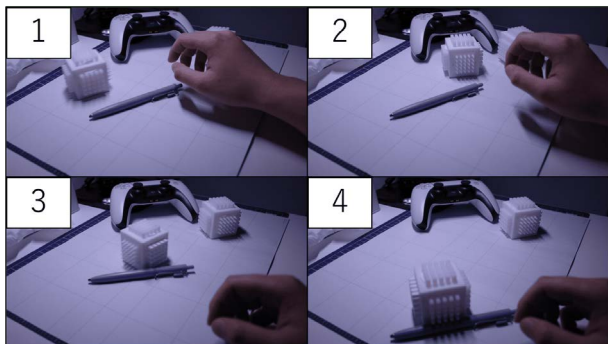


図 11 応用例 2: ゲームの誘惑を阻止して作業を促す

Fig. 11 Application 2: Preventing game distractions to encourage work.

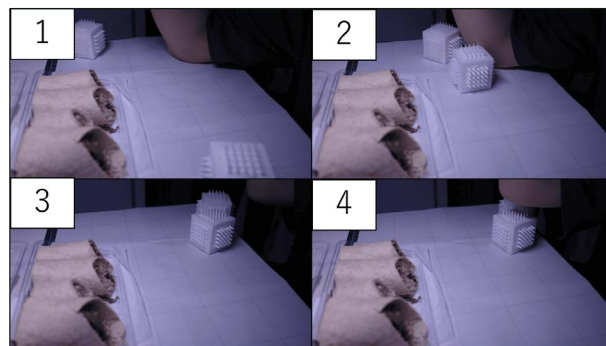


図 12 応用例 3: 食事中のバッドマナーを注意する

Fig. 12 Application 3: Notifying bad manners during meals.

6. 性能評価

6.1 目的と手法

性能評価の目的は、動作探索ツールで記録/安定化処理を行った軌跡が、記録時と同一の時間/軌跡で再生可能か検証することである。

次に、実験条件について述べる。toioには、テクスチャマウントと周囲5面に基本形状としている平円柱のテクスチャプレート装着した状態で検証を行った。プレイマットは、A3サイズのものを使用し、記録/再生時にマットの位置が動かないよう机の上にマスキングテープで固定した。プレイマットの座標系は、左上座標が(98, 142)、右下座標が(402, 358)となる。動作パターンには、図13に示す4種類(斜め、四角、蛇行、突く)を用意した。

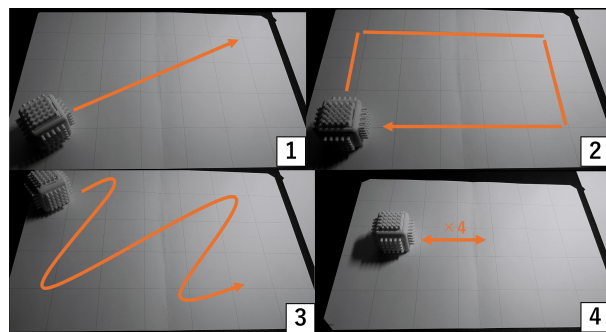


図 13 検証した動作パターン

Fig. 13 Verified movement patterns.

次に実験の手順について述べる。

- (1) 実験者は図13のパターン通りに、プレイマット上でtoioを移動させる。記録された時間/座標情報に対して、安定化処理を適用した「記録軌跡」をCSVファイルに保存する。
- (2) ロボットを記録開始位置と同じ場所に設置し、記録軌跡をもとに再生を開始する。再生時のロボットの移動軌跡(経過時間/座標情報)を計測し、再生終了後に「再生軌跡」としてCSVファイルに保存する。

- (3) 記録時／再生時の様子はビデオで記録する。
- (4) 「記録軌跡」と「再生軌跡」をグラフにプロットして比較する。

6.2 結果と考察

性能評価の実験結果について述べる。記録時／再生時の移動軌跡を二次元にプロットしたものを図 14 に、座標の時間変化を図 15 に示す。1 の斜め移動については、移動軌跡はほぼ一致しており、時間変化はわずかな遅れがあるものの、ビデオを目視で確認したところほとんど違いは観察できなかった。2 の四角移動については、時間変化は概ね一致しているものの、移動軌跡を見ると方向転換時に膨らんでおり、ビデオでも明確な差が観察された。これはロボットが進行方向を変える際に、次の目標座標に向けて移動しながら回転するためと考えられる。膨らみを軽減する手段として、方向転換後の目標座標を考慮して移動する方法や、回転してから移動する方法などを検討していく。3 の蛇行移動については、四角移動と同様の傾向があり、時間変化は概ね一致しているものの、移動軌跡が方向転換時に膨らんでいた。一方、ビデオを目視で確認したところ、わずかにカーブの半径は大きいものの、四角移動のように明確な差は感じられなかった。4 の突く移動については、移動軌跡はほぼ一致しているが、時間変化の差は最も大きく、再生軌跡の方が 3 秒程度早く終了している。これは、短い時間で前進と後進を切り替えているため、再生時の目標座標の判定（目標座標より閾値分前で折り返す処理）に伴う誤差が蓄積しやすかったためだと考える。このような動作は繰り返し刺激を与える意図で利用されることが多いため、実用的には大きな問題とならない可能性もあるが、今後は移動判定の閾値の調整等の検討も進めていく。

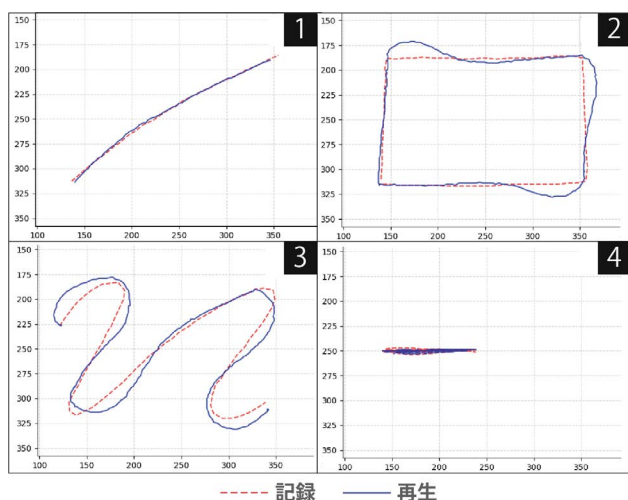


図 14 記録時／再生時の移動軌跡

Fig. 14 Movement trajectories during recording/playback.

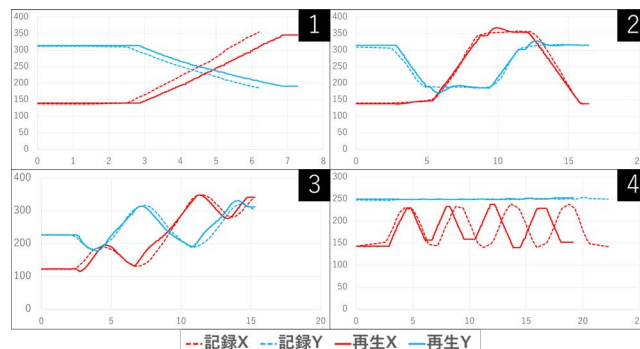


図 15 記録時／再生時の時間変化（縦軸：座標，横軸：経過時間）

Fig. 15 Time changes during recording/playback.

7. ワークショップ

ロボットと動作探索ツールを用いて、実際に作品を作成するワークショップ形式の実験を行った。

7.1 目的

本実験の目的は、被験者に動作探索ツールを用いて自由に作品を作成してもらい、本研究の表現／応用の可能性を調査すると共に、作品の特徴／傾向からテクスチャ／動作の活用方法を分析することである。

7.2 手法

1 ターム 70 分程度の実験を 3 回実施した。1 タームあたり 2 名として、合計 6 名の男性（20 代前半）に参加してもらった。このうち toio の使用経験があったのは 2 名、Unity の使用経験があったのは 3 名であった。

次に、実験手順を説明する。

- (1) 実験者は、システムの概要・デバイスの使用方法について、スライドや実演を交えて紹介した。また、制作例として、「5. 応用例」の事例を 50 秒程度のデモビデオで紹介した。
- (2) 被験者にデバイスと動作探索ツールを使用して机上で作品を制作させた（約 30 分）。
- (3) 被験者に作品名と作品内容を説明させた。
- (4) 被験者にアンケートとインタビューに回答させた。

被験者には、動作探索ツールを導入したノート PC（Surface Book）とデバイス一式（toio、テクスチャプレート 5 種、テクスチャマウント等）を配布した。toio は、1 人あたり 2 台を上限とし、それぞれ A3 サイズのプレイマットを 1 枚配布した。また被験者には、普段から利用している私物を 2 つ程度任意で持参してもらった。ワークショップの様子を図 16 に示す。

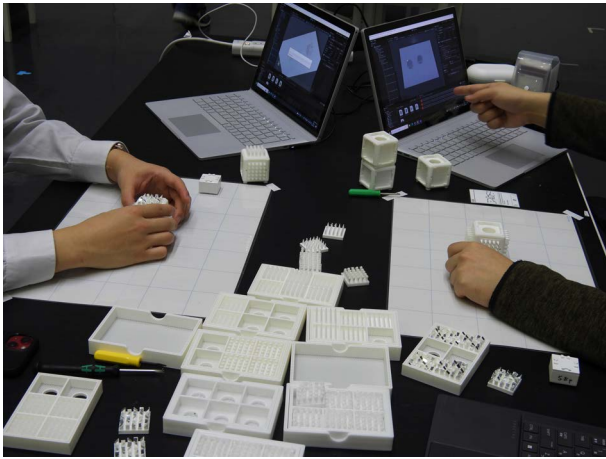


図 16 ワークショップの様子
Fig. 16 Workshop scene.

7.3 結果

ワークショップの結果について述べる。被験者 A～F が制作した作品名や統計情報を図 17 に、各作品の流れを図 18 に示す。まず、図 18 を元に、各作品の流れを紹介する。被験者 A は、集中したら時間を忘れてしまう自身の問題意識から、ポモドーロタイマーのような例を制作した。テクスチャにミラー／円錐を付与することで視覚／触覚の両方を刺激し、気づきを与えやすくする工夫をしていた。被験者 B は、喫煙行為を管理する例を制作した。柔軟テクスチャで「吸っていいよ」というメッセージを示し、丸円柱／円錐を備えたロボットが吸い殻を回収することで、優しさ／厳しさ（「しっかりと捨てて」）の 2 面性を表現しようとしていた。被験者 C は、ロボットを擬人化して対立する 2 人に見立て、ロボットがすれ違うときに両者に共通するテクスチャを近づけることで、徐々に互いを理解していくストーリー作品を制作した。両者の色々な面を見ないと理解し合えない現代社会の表現を試みており、テクスチャとしては、円錐／丸円柱で真逆の性格を、柔軟素材で心の脆さを表現した。被験者 D は、パズルゲーム「倉庫番」の挙動をロボットの動きで表現した。テクスチャなどを無造作に配置して倉庫感を表現し、ロボットの動きで未利用のマウントを押して、目標座標まで運搬している。本システムでは、ロボット以外のオブジェクトの位置認識をしていないが、単純な運搬作業であれば実現できることが分かる。被験者 E は、自身の失くし癖を矯正する想定作品を 4 つのシーンで制作した。所定の位置（ロボット上面）によく無くすものを置き、ロボットの動きで目立たせる工夫を試みていた。ロボットを日常生活に取り入れ、共に過ごそうとした作品であった。被験者 F は、趣味のドラムから想起し、リズムパターンを触覚刺激で提示する作品を制作した。通常は「耳コピ」や「目コピ」で譜面を覚えるが、「触コピ」という新しい概念を作品に込めたと述べていた。テクスチャとしては、円錐でハイハット（やや高い金属音）を、

柔軟素材でスネア（小型の太鼓音）として使い分けて、音を触覚刺激で表現していた。

7.4 考察

全体的な傾向としては、被験者 ABEF はテクスチャの印象や特性を使い分けて、ユーザ（自分）に情報提示する、実用場面を考慮した作品を制作しており、被験者 CD はロボット自体を擬人化して、動きや外観を鑑賞する作品を制作していた。テクスチャと動作の観点から分類して記述する。

7.4.1 テクスチャ

図 17 より、使用されたテクスチャの数は最小 2 個～最大 10 個と幅があり、前述したように様々な表現を目的として利用された。

被験者 ABCF の作品では、テクスチャの形状から想起される印象（優しさ／厳しさ、高い金属音等）を表現するために使用していた。特に円錐の形状は被験者 ABCE の作品で採用されており、合計で 15 個使われていた。被験者 F の高い金属音を表現する以外では、負の印象や注意喚起等の通知をユーザに与えることを目的として使用されていた。円錐と丸円柱／柔軟素材のように対を成す関係性（優しさ／厳しさ等）で使われることが多く、2 つのロボットに付与したり配置面を使い分けて刺激提示する様子が観察された。逆に平円柱の形状は、被験者 CD でしか使用されておらず、使用された個数は合計で 3 個であった。基本形として試作した平円柱は刺激提示において、あまり特徴がなく用途が限られるようであった。しかし、平円柱の形状が基準となり、相対的に丸円柱と円錐の役割を際立たせる効果もあると考えられる。

被験者 DE の作品では、テクスチャの形状や材質が持つ機能性に着目して利用されていた。被験者 D は、物体を安定して運搬することを目的として、平円柱のテクスチャであれば接地面が大きく、効率的に押し出すことができるという理由から選択されていた。また被験者 E の作品では、上面に柔軟素材のテクスチャを付与することで、置いたものを傷つけることがなく、複雑な形状のものでも安定して固定できるという理由から選択していた。

被験者 BDEF では、刺激提示に使用しない面にはテクスチャプレートを配置しない選択をする傾向が見られたほか、被験者 B の作品では、toio を取り外す用途で設計した押し出し穴を活用して、持参物を配置して運搬する様子も確認できた。

7.4.2 動作

図 17 より、動作時間は被験者 ABDEF は約 15 秒～40 秒程度であったが、被験者 C のみ 120 秒と長い作品を制作していた。

被験者 AF では、性能評価の 4 のような突く移動が多用されていた。被験者 A では、ミラーテクスチャを備えたロ



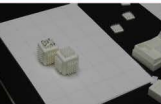



被験者	A	B	C	D	E	F
作品						
作品名	タイムマネージャー アシストイオ	タバコマネージャー アシストイオ	SHIN-PI	倉庫番	あるべき場所へ	toi-rhythm
使用 テクスチャ	円錐 : 4個 ミラー : 6個	丸円柱 : 2個 円錐 : 2個 柔軟 : 4個	平円柱 : 1個 丸円柱 : 2個 円錐 : 2個 柔軟 : 4個 ミラー : 1個	平円柱 : 2個	円錐 : 6個 柔軟 : 2個	円錐 : 1個 柔軟 : 1個
動作時間	21秒	39秒	120秒	22秒	10秒 15秒 9秒 14秒	24秒
利用した 持参物	なし	電子タバコの機械 専用タバコ	なし	なし	ギターピック めがね	なし

図 17 制作された作品と統計情報

Fig. 17 Created works and statistical data.

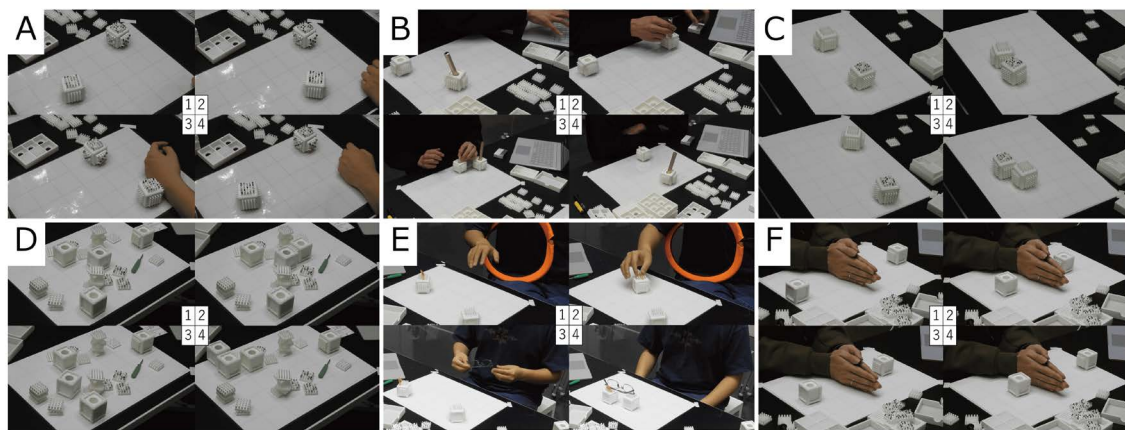


図 18 各作品の流れ

Fig. 18 Snapshots from each work.

ボットが視覚刺激による気付きを与えやすくするため、左右に反復移動して目立たせる動作を入力していることが確認できた。また被験者 AF の作品では、共通して手腕に突く動作で触覚刺激を与える動きを制作していた。使用場面の前提として、被験者 A はなにか作業をして集中している状況下で腕に触覚刺激を与える想定だが、被験者 F では楽曲の暗譜をする状況であり、ロボットの刺激タイミングやテクスチャの形状に注意を払っていた。ある程度速度があれば、触覚的に円錐と柔軟素材の形状や質感は分別できるが、平円柱と丸円柱は分別できないといった意見があった。指や手の甲、腕など体の部位によって弁別閾は異なるため触覚刺激に焦点を当てる場合、より詳細な検証と形状の設計を試みる必要がある。

被験者 BDE は、共通してオブジェクトを運搬する動作が確認できた。被験者 BE は、テクスチャマウント上面にオブジェクトを積載する運用をしていたが、被験者 D はロボットでオブジェクトを押す動きを作成しており、運搬

方法にも違いが見られた。被験者 BE の作品は、自身の動作をトリガーとしてロボットが動く想定（楽器の演奏が終了したらピックを取りに来る等）であったため、ロボットの動作タイミングを調整して作品の制作をしている様子であった。

被験者 C の作品では、2 台のロボットが連携して動作する様子が見られ、多様な動きを制作していた。プレイマット全体を使って大回りして方向転換する場面や、ロボット同士が接近して互いの共通する柔軟素材のテクスチャを接触させる場面が確認できた。この作品では細かな位置制御が必要であったが、ある程度被験者が想定していた動きを作ることができた。その反面、複雑な入力や調整が必要で事前に動かし方を細かく考える必要があり、試行錯誤する様子が見られた。動作ごとに分けて記録して順番を調整／連結できるような機能の実装を検討していきたい。

8. 議論

本システムの主な課題について議論する。

ワークショップで細かな動きが思い通り作成できないといったコメントがあった。具体的には入力した軌跡よりも手前で再生が終了してしまったり、向きを変えるための回転動作ができない場面があった。この原因は、再生時に目標座標への到達を判定する閾値の設定が緩いためと考えている。閾値の調整で解決できる可能性はあるが、「4.4 動作探索ツール」で説明したように toio の細かい軌道修正が発生して通信負荷が増える等の副作用も予想されるため、慎重に調整を進めて行きたい。

8.1 インタラクション機能と実現方法

ここでは、ワークショップで試作された作品例の観察を通して、本研究に今後付加すべきインタラクションとその実現方法について議論する。まず、ワークショップで実装された作品を実場面で動作させるために必要なセンシング機能について整理する。作品 C では、2 台のロボットで作品が完結しており、手指やモノの検出は必要ない。作品 D では、目的地への到達判定のために、ロボットが押すモノの位置検出が必要となる。作品 AEF では、ユーザの手に対してロボットを移動させたり触覚刺激を与えているため、手の位置検出が必要である。作品 BE では、ユーザがロボットに触れることで、ロボットの挙動を切り替えており、ロボットに対する手指の接触（能動的な操作）の検出が必要である。

次に、これらの「特定のモノの位置検出」「手の位置検出」「ロボットに対する手指の接触」の実現方法について議論する。まず、本システムでは toio と専用プレイマットを利用してロボットの絶対位置を検出しており、この方式との親和性を考慮する必要がある。2.5 節では、机上の手やモノを検出する手法を大きく 3 種類紹介したが、「机下方に赤外線カメラを設置する方式」はプレイマットと干渉して利用が難しいため、「(1) 机上方にカメラを設置する方式」「(2) 平面にアンテナを巡らせ静電量を検出する方式」と、「(3) toio 自体のセンサを活用する方式」について議論する。(1) の机上にカメラを設置する方法は、ToF 方式の赤外線カメラと Media Pipe^{*4}等を用いることで、モノ／手指の位置検出機能を手軽に実装できると考える。一方で、机上方にポール等でカメラを固定する必要があるため可搬性に欠ける点や、toio と位置検出手法が異なるため座標系を調整する手間が生じる等の課題がある。(2) 静電容量方式を用いる方法は、格子状のパターンを薄型のプリント基板等で実装して、プレイマットの下に引くことで、toio の位置検出機能を妨げずに、手指／モノ（導電体のみ）の接

触位置を検出できると考える。プレイマットは薄手の紙であり、iPad のような静電容量式タッチパネルの動作を妨げないことを確認している。また、プレイマットとサイズを合わせて実装することで、座標系を概ね揃えることができる。一方で、専用のハードウェアを実装する必要がある、運用には一定の制約が生じる。また、手指はある程度机に近接していないと検出が難しい。(3) toio 自体をセンサとして活用する方式として、まず toio には加速度センサ／押しボタンが内蔵されており、ロボットに対する手指の接触検出に活用できる。例えば、作品 B でロボットにモノを乗せた後に、ロボットを叩く／押し込むような動作をすることで、動作開始をロボットに通知することができる。また、操作対象以外の toio の位置情報や加速度センサを用いて、モノの検出に利用できる可能性がある。例えば、D の事例で、押す対象のモノに toio を内蔵することで、モノの位置を手軽にトラッキングできる。一方、ユーザの手指の位置検出は困難である。また、toio は 1 台 7000 円程度でセンサとしてみると高価であるため、多数のモノに埋め込むような使い方は難しい。

このように、カメラ／静電容量センサ／toio の内蔵センサを組み合わせることで、ワークショップで制作された作品は概ねインタラクティブに動作するように実装できると考えている。各方式にはそれぞれ課題もあるが、最も実装が容易で現在の動作探索ツールに組み込みやすい toio の内蔵センサを用いる方式と、その弱点（手指検出）を補う静電容量方式の組み合わせを中心として、今後更なる実装／検証を進めていきたい。

9. 結論

本研究では交換可能なテクスチャを備えた小型ロボットを物理的に駆動し、形状や動きの組み合わせを変化させてユーザに触覚／視覚的な刺激を与えることで、情報提示をするシステムを提案した。また、小型ロボットにテクスチャを付与するためのマウント部品やテクスチャプレート（基本的テクスチャ・柔軟テクスチャ・ミラーテクスチャ）の試作と動きの考察・実装をした。加えて、小型ロボットとテクスチャのデジタルツインを仮想空間上に作成し、例示プログラミング手法で小型ロボットの形状や動きを調整／シミュレーション可能な動作探索ツールを構築した。さらに、性能評価とワークショップを通して、本研究の有効性や、多様な応用例の探求、課題の整理等を行った。

今後は、議論で述べたような課題を解決するとともに、システムの改善や効果的な応用例の構築を進めていく。

参考文献

- [1] Suzuki, R., Zheng, C., Kakehi, Y., Yeh, T., Do, E. Y.-L., Gross, M. D. and Leithinger, D.: ShapeBots: Shape-changing Swarm Robots, *Proceedings of the 32nd An-*

^{*4} <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/>

- nual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 493–505 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3332165.3347911> (2019).
- [2] 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, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 97–109 (online), available from <https://doi.org/10.1145/2984511.2984547> (2016).
 - [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), available from <https://doi.org/10.1145/3379337.3415831> (2020).
 - [4] Suzuki, R., Ofek, E., Sinclair, M., Leithinger, D. and Gonzalez-Franco, M.: Demonstrating HapticBots: Distributed Encountered-type Haptics for VR with Multiple Shape-changing Mobile Robots, *Adjunct Proceedings of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21 Adjunct, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 131–133 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3474349.3480202> (2021).
 - [5] Li, J., Sousa, M., Li, C., Liu, J., Chen, Y., Balakrishnan, R. and Grossman, T.: ASTEROIDS: Exploring Swarms of Mini-Telepresence Robots for Physical Skill Demonstration, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), available from <https://doi.org/10.1145/3491102.3501927> (2022).
 - [6] Kim, L. H. and Follmer, S.: SwarmHaptics: Haptic Display with Swarm Robots, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3290605.3300918> (2019).
 - [7] Zhao, Y., Kim, L. H., Wang, Y., Le Goc, M. and Follmer, S.: Robotic Assembly of Haptic Proxy Objects for Tangible Interaction and Virtual Reality, *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 82–91 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3132272.3134143> (2017).
 - [8] Dementyev, A., Kao, H.-L. C., Choi, I., Ajilo, D., Xu, M., Paradiso, J. A., Schmandt, C. and Follmer, S.: Rovables: Miniature On-Body Robots as Mobile Wearables, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 111–120 (online), available from <https://doi.org/10.1145/2984511.2984531> (2016).
 - [9] Ion, A., Kovacs, R., Schneider, O. S., Lopes, P. and Baudisch, P.: Metamaterial Textures, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3173574.3173910> (2018).
 - [10] Hu, Y. and Hoffman, G.: Using skin texture change to design emotion expression in social robots, *Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, HRI '19, IEEE Press, p. 2–10 (2020).
 - [11] Hu, Y., Neto, I., Ryu, J., Shtarbanov, A., Nicolau, H., Paiva, A. and Hoffman, G.: Touchibo: Multimodal Texture-Changing Robotic Platform for Shared Human Experiences, *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22 Adjunct, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), available from <https://doi.org/10.1145/3526114.3558643> (2022).
 - [12] 家山 剣, 塚田浩二: 小型ロボットとテクスチャを組み合わせた情報提示手法の提案, エンタテインメントコンビューティングシンポジウム 2023 論文集, pp.262-269. (2023).
 - [13] 家山 剣, 塚田浩二: デジタルツインを活用した小型ロボットとテクスチャを組み合わせた情報提示手法の探索, インタラクシオン 2025 論文集, 2B19. (2025).
 - [14] 家山 剣, 塚田浩二: 例示プログラミングを活用した小型ロボットとテクスチャを組み合わせた情報提示手法の探索, 情報処理学会研究報告, 2024-HCI-212. (2025).
 - [15] Wang, K., Wang, Z., Nakagaki, K. and Perlin, K.: “Push-That-There”: Tabletop Multi-robot Object Manipulation via Multimodal ‘Object-level Instruction’, *Proceedings of the 2024 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2497–2513 (オンライン), DOI: 10.1145/3643834.3661542 (2024).
 - [16] Ihara, K., Faridan, M., Ichikawa, A., Kawaguchi, I. and Suzuki, R.: HoloBots: Augmenting Holographic Telepresence with Mobile Robots for Tangible Remote Collaboration in Mixed Reality, *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3586183.3606727 (2023).
 - [17] 荒井将来, 田中浩也: 3D プリンタへの物理的振動付与によるテクスチャ生成の応用可能性, *Proceedings of 4DFF2020*, pp. 19–22 (2020).
 - [18] Sakura, R., Han, C., Watanabe, K., Yamamura, R. and Kakehi, Y.: Design of 3D-Printed Soft Sensors for Wire Management and Customized Softness, *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), available from <https://doi.org/10.1145/3491101.3519906> (2022).
 - [19] Nakayama, R., Suzuki, R., Nakamaru, S., Niiyama, R., Kawahara, Y. and Kakehi, Y.: MorphIO: Entirely Soft Sensing and Actuation Modules for Programming Shape Changes through Tangible Interaction, *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, DIS '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 975–986 (online), available from <https://doi.org/10.1145/3322276.3322337> (2019).
 - [20] Raffle, H. S., Parkes, A. J. and Ishii, H.: Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 647–654 (online), available from <https://doi.org/10.1145/985692.985774> (2004).
 - [21] Nakagaki, K., Follmer, S. and Ishii, H.: LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*,

- UIST '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 333–339 (online), available from <https://doi.org/10.1145/2807442.2807452> (2015).
- [22] Koiike, H., Sato, Y., Kobayashi, Y., Tobita, H. and Kobayashi, M.: Interactive textbook and interactive Venn diagram: natural and intuitive interfaces on augmented desk system, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 121–128 (online), DOI: 10.1145/332040.332415 (2000).
- [23] Matsushita, N. and Rekimoto, J.: HoloWall: designing a finger, hand, body, and object sensitive wall, *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '97, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 209–210 (online), DOI: 10.1145/263407.263549 (1997).
- [24] Han, J. Y.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '05, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 115–118 (online), DOI: 10.1145/1095034.1095054 (2005).
- [25] Rekimoto, J.: SmartSkin: an infrastructure for free-hand manipulation on interactive surfaces, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 113–120 (online), DOI: 10.1145/503376.503397 (2002).
- [26] Voelker, S., Nakajima, K., Thoresen, C., Itoh, Y., Øvergård, K. I. and Borchers, J.: PUCs: detecting transparent, passive untouched capacitive widgets on unmodified multi-touch displays, *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 101–104 (online), DOI: 10.1145/2512349.2512791 (2013).

家山 剣

2000 年生。2023 年公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科卒業。2025 年同大学大学院システム情報科学研究科修了。

塚田 浩二

1977 年生。2005 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。博士（政策・メディア）。産業技術総合研究所，お茶の水女子大学，科学技術振興機構さきがけ研究員を経て，2013

年より公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科准教授。2023 年より同教授。日用品インタフェース，マテリアルインタラクション等の研究に従事。2012 年イグノーベル賞（音響学）受賞。