

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

家山 剣^{1,a)} 塚田 浩二¹

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。

Exploring Information Presentation by Combining Small Robots and Textures using Programming by Example

TSURUGI IEYAMA^{1,a)} KOJI TSUKADA¹

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] が盛んに行われている。小型ロボットは机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。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が困難であり拡張性に欠ける課題があった。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情報提示の幅を広げる仕組みを提案する。これまでに手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 [4] 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 [6][7] 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。

加えて本研究では、このシステムを用いた応用例の探索を支援するツールを提案・実装する。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(図1)。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させることができる。これによりロボットの形状/動きの探索が容易になり、本システムを用いた応用例を構築しやすくなると考える。

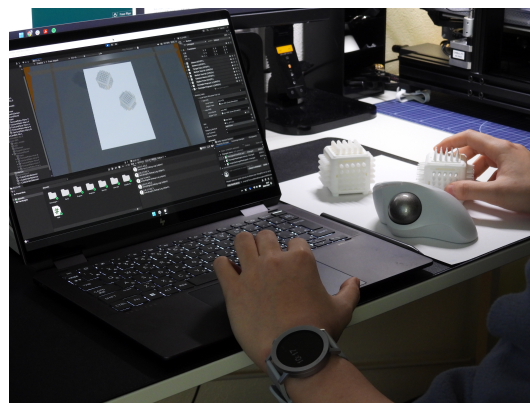


図1 動作探索ツールの利用例

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate
^{a)} g2123003@fun.ac.jp

2. 関連研究

本研究に関連する研究事例として、「小型ロボットを活用したインタラクション研究」、「多様な質感や機能を持つテクスチャを造形する研究」、「表面形状とロボットを組み合わせた研究」、「例示プログラミングを用いてデバイスを制御する研究」の4つに分類して説明する。

2.1 小型ロボットを活用したインタラクション研究

小型ロボットを用いた情報提示やユーザの生活をサポートする研究が行われてきた。Suzukiら[1]は、自己変形が可能な群ロボットを用いて、データの可視化や日常生活のサポートをする「ShapeBots」を提案した。データの可視化をする例として、プロジェクタで投影したマップの任意の位置に小型ロボットを配置して、地域の人口をロボットに搭載されたペンディスプレイの高さを変化させて表現した。Nakagakiら[2]は、「メカニカルシエル」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で多様な動きや入力を行う「HERMITS」を提案した。Kimら[3]は、群ロボットを用い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。デザイン空間の設計を行い、複数のアプリケーション例を実装して、被験者の受け取る感情等を調査した。

本研究では、電気的な制御を必要としないテクスチャを小型ロボットに着脱可能な設計とすることで、複数台の小型ロボットの動きのパターンと形状の組み合わせだけで、多様な情報提示を試みる点が特徴である。

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[4]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。Sakuraら[5]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。格子構造のパラメータ調整により形状設計の自由度が広がり、部分的に柔らかさを変更可能な一体造形手法を実現した。

本研究では、現段階で一般的な家庭用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[6]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。Huら[7]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。空気圧で動的に形状変化するテクスチャを提示する機能を持ち、提案されたロボットでストーリーテリング活動をサポートする。

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。

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[8]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。Nakagakiら[9]は、蛇型ロボットにヒントを得た線形の形状変化インタフェースである「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。Hayesら[10]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。例えば、犬の骨格を模した形状を組み立て、脚の接続部分を回転させることで歩行動作を記録し、繰り返し再生することで、歩行させることができる。

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。

3. 提案

本章では、提案システムの概要と構成について説明する。

3.1 システム概要

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

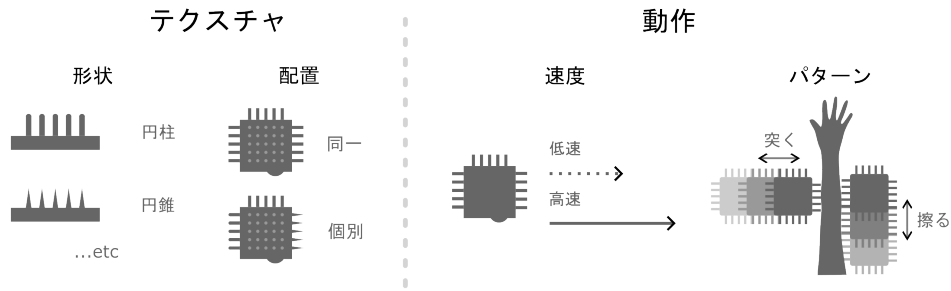


図 2 本システムで変更可能なパラメータ

作のパラメータを変化させることができる。図 2 に本システムで調整可能なパラメータ群を示す。ここでは、テクスチャ形状・テクスチャ配置・動作速度・動作パターンを紹介する。

テクスチャ形状については、円柱／円錐等の同一形状を敷き詰めることで視覚／触覚的に異なる刺激を与える。

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印象を統一できる。

小型ロボットの動作速度については、低速から高速まで多段階で制御可能であり、触覚刺激の強さを調整したり、動きの激しさから視覚的な印象を変化させる。

動作パターンについては、直線移動と回転移動を併用した複数の可能性があるが、特に物理的にユーザに接触して触覚刺激を与える動きとして、突く／擦るの 2 種類に着目する。

さらに、応用例の探索を支援するために、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 3)。仮想空間のロボットのテクスチャを面毎に入れ替えたり、仮想空間上で仮想的な目標座標 (例：机上作業中の手の位置) を設定し、そこに対してロボットを移動させるようなシミュレーションも行える。



図 3 デジタルツインシステム概要

3.2 システム構成

最初にシステム構成図を図 4 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 プリンタ等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 に固定するテクスチャマウントから構成される。

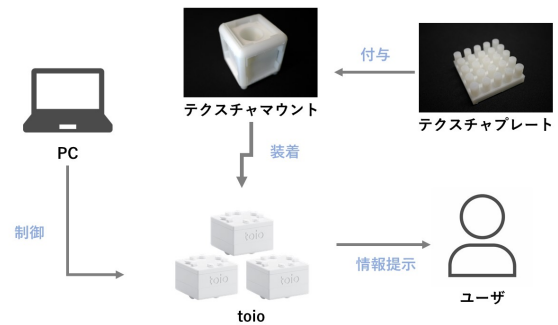


図 4 基本システム構成図

4. 実装

本研究では、SONY が販売する小型キューブロボットの toio を利用した。toio に関する基本的な説明と開発環境について説明した後、toio に装着する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

toio^{*1}とは、SONY から発売されている小型キューブ型ロボットである。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ための小型ロボットとして利用した。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/s の直進、1500° /s の回転が可能で、PC から BLE 経由で制御できる。また、キューブ上面に様々なモノを載せる想定で

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

設計されており、200gの重量まで積載して走行できる。付属プレイマットには、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 toio の絶対位置の検出や指定座標への移動ができる。このように小型で十分な移動性能と積載重量を持ち、多様な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。

4.1.2 開発環境

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。toio の制御には、複数の方法があるが、本システムでは、複数台制御に適している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。toio 公式からは、Unity 用の SDK が提供されている。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。この SDK には、豊富なライブラリやアセットが事前に用意されており、現実空間での複数台の toio の移動や、toio へのインタラクションの検出（持つ／置く、押し込む、引っ張る）等を仮想空間と同期しながら行うことができる。

4.2 テクスチャマウント

テクスチャマウントは、toio にテクスチャプレートを設置するための拡張部品を指す。toio をテクスチャマウント底面の窪みに差し込み、被せて利用する。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、素材には、造形時の反りが少ない PLA 樹脂^{*3} 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、toio を奥まで押し込むと全体が覆われる。また、toio をテクスチャマウントから取り外す際は、上面に設けた穴から指や棒で押し出して簡単に取り外せる設計にした。側面と上面の計 5 面にテクスチャプレートを嵌め込む窪みを用意した。窪みの外周に薄い隙間を作り、テクスチャプレートを嵌めることで板バネの役割を持たせて、安定した固定ができるように配慮した。

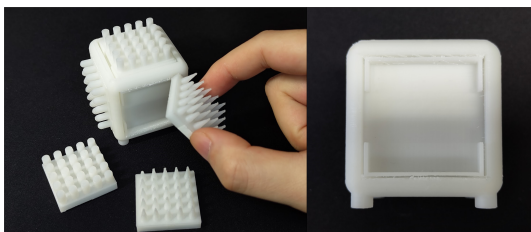


図 5 マウントへのテクスチャプレートの装着例／嵌め込み部

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

^{*3} PolyMax PLA White

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 (Ender-3 V2 Neo) 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)。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、円錐を攻撃的といった印象を与える意図で作成した。



図 6 基本テクスチャ (平円柱・丸円柱・円錐)

4.3.2 柔軟テクスチャ

TPU (熱可塑性ポリウレタン) 素材は、プラスチックの 1 種であると同時に弾力性があり柔らかい感触を持つ (図 7)。使用するフィラメントとして TPU90 樹脂^{*4} を利用した。よりテクスチャの柔軟な感触を強調するために、柱の根元に向かうにつれて細くなるようモデル形状を工夫した。

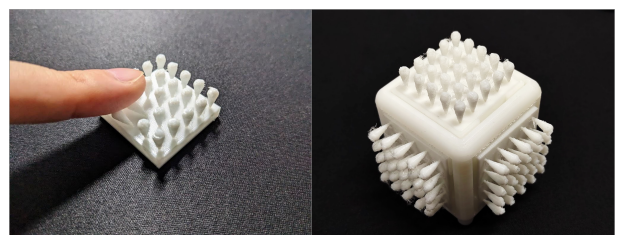


図 7 フレキシブルフィラメントで造形した柔軟テクスチャ

4.3.3 ミラーテクスチャ

視覚的な刺激を与えるものとしてミラーテクスチャを試作した (図 8)。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動き回ることによって、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。例えば、望ましくない作業を邪魔するために、ロボットが反射光でユーザの注意を逸らしたり、重要

^{*4} PolyFlex TPU90 White

なメモ書きにスポットライトを当てて目立たせるような応用例が考えられる。

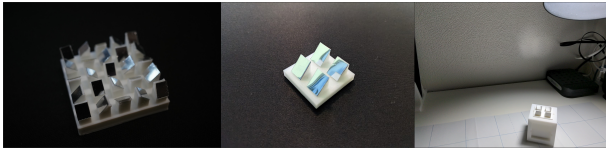


図 8 ミラーテキストチャの外観／反射光が壁に投影される様子

4.4 動作探索ツール

本研究におけるデジタルツインシステムとは、現実世界の小型ロボットの絶対位置や向きを toio に内蔵されている読み取りセンサと付属プレイマットを使用して検出し、仮想世界にリアルタイムで反映させる機能である。デジタルツインのシステムの流れを図 9 に示す。さらに本研究で利用しているテキストチャマウント／テキストチャプレート等の 3D モデルをアセットに取り込み、シミュレータ上で手軽に交換できる機能を実装した。これ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 (図 3)。

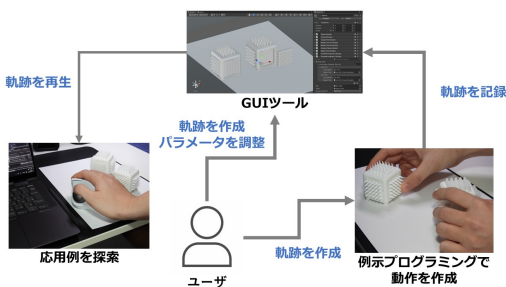


図 9 デジタルツインシステムの流れ

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実装した。記録開始すると現実空間／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。

なお、単純に毎フレーム記録した座標に移動させる処理を行うと、命令が頻繁に送信され負荷が増加したり、なめらかな動きが再現できない問題があった。そこで、記録した座標データに対して、移動平均と線形補間を利用した平滑化処理を行うことで、再生時の移動命令を削減して負荷を軽減している。線形補間を行う閾値は、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。

さらに、仮想空間上にはターゲットオブジェクトを配置することができ、そこに対してロボットを移動させ、対

象に触覚刺激等を与える動きをシミュレーションできる。ターゲットオブジェクトはプレイマット上であれば自由に配置し、時間経過と共に移動させることもできる。

5. 応用例

動作探索ツールの開発以前に著者が実装した応用例を 2 つ紹介する。小型ロボットの位置認識は行っているが、その他のデバイスや手の位置認識については実装しておらず常に固定された状態になっている。今後 toio のセンサを流用して、手や他デバイスの位置を検出する手法等を検討していく。

1 つ目の応用例として、小型ロボットの動きとテキストチャ形状を活用してタイマーのように機能する場面を想定した (図 10)。1 度目の通知では丸円柱で優しく突き、小型ロボットの上面を押してスヌーズ機能を実行する。2 度目の通知は円錐で激しく突くようになり、上面のテキストチャも尖っているため小型ロボットの上面が押し込みづらくなる。ここで再度スヌーズ機能を実行すると、次の通知では 2 台の小型ロボットが激しく交互に突くようになる。このように時間が経過するにつれて緊急性や重要性が増す状況を形状と動作のパラメータ (速度：遅く／速く) で緊急度合いを表現するような情報提示を狙った。

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)。小型ロボットが円錐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円柱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、テキスト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。

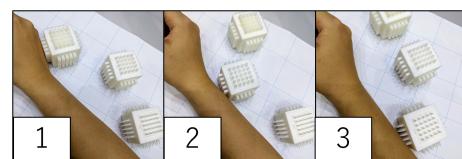


図 10 順番に刺激を与える動作例

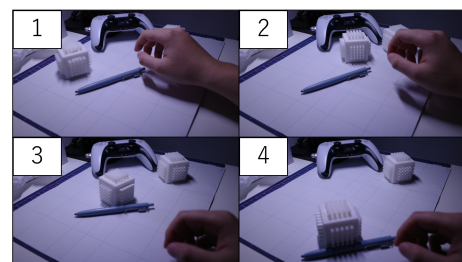


図 11 ゲームの誘惑を阻止し、作業を促す応用例

6. 性能評価

6.1 目的と手法

動作探索ツールでロボットの動きを記録し、同一の軌跡で再生可能か検証することを目的とする。

ここでは、性能評価の手法について述べる。また、記録した移動軌跡に移動平均と線形補間を適用したものを「記録軌跡」、ロボットを再生したときに実際に辿った移動軌跡を「再生軌跡」と呼ぶ。toioには、テクスチャマウントと周囲5面に平円柱のテクスチャプレートを装着した状態で検証を行った。プレイマットには、A3サイズのフィールドを使用し、記録/再生時にマットの位置がずれないように机の上にマスキングテープで固定した。プレイマットには、toio用の座標が割り振られており、マット中心が原点になっている。左上座標が(98, 142)、右下座標が(402, 358)を指す。動作パターンには、図12に示す4種類(斜め、四角、蛇行、突く)を用意した。

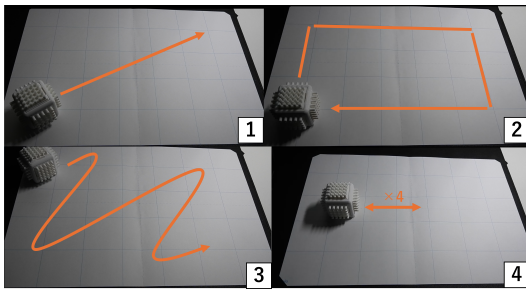


図12 検証する動作パターン
1: 斜め, 2: 四角, 3: 蛇行, 4: 突く

次に実験の手順について述べる。

- (1) 実験者は図12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、移動平均と線形補間を適用したものを「記録軌跡」として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)をリアルタイムで記録し、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

性能評価の実験結果について述べる。斜め移動/四角移動/蛇行移動については、若干の遅延や座標のずれは見られるものの、概ね記録軌跡/再生軌跡は一致する傾向にあった。

一方、突く移動については、他と比べて誤差が大きく、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、再生時に誤差が蓄積しやすかったためだと考える。

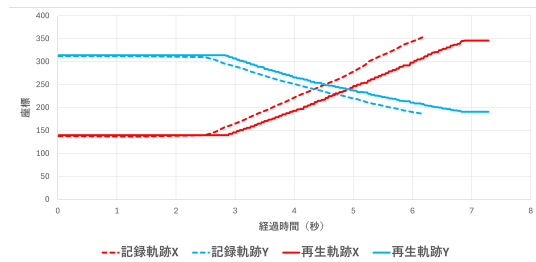


図13 斜め移動の軌跡の時間変化(記録時/再生時)

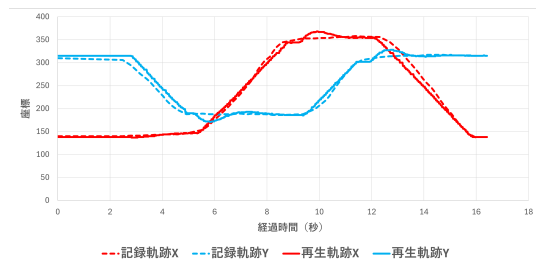


図14 四角移動の軌跡の時間変化(記録時/再生時)

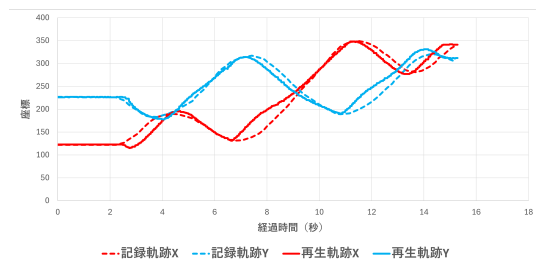


図15 蛇行移動の軌跡の時間変化(記録時/再生時)

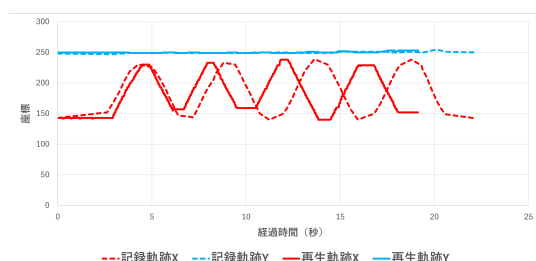


図16 突く移動の軌跡の時間変化(記録時/再生時)

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。

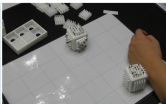

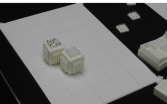



被験者	A	B	C	D	E	F
作品						
作品名	タイムマネージャー アシストイオ	タバコマネージャー アシストイオ	SHIN-PI	倉庫番	あるべき場所へ	toi-rhythm
使用 テクスチャ	円錐 : 4個 ミラー : 6個	丸円柱 : 2個 円錐 : 2個 柔軟 : 4個	平円柱 : 1個 丸円柱 : 2個 円錐 : 2個 柔軟 : 4個 ミラー : 1個	平円柱 : 2個	円錐 : 6個 柔軟 : 2個	円錐 : 1個 柔軟 : 1個
動作時間	21秒	39秒	120秒	22秒	10秒 15秒 9秒 14秒	24秒
利用した 持参物	なし	電子タバコの機械 専用タバコ	なし	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

図 17 被験者が制作した作品

7.1 目的

本実験の目的は、被験者に作品を作成してもらい、作品の特徴／傾向、動作探索ツールの課題等を調査することである。

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・制作例について、スライドや実演を交えて紹介した。
- (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 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。

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 が制作した作品概要を図 17 に示す。まず、各作品について概要を紹介する。被験者 A は、集中したら時間を忘れてしまう問題意識から、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のある作品を 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。

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。

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。

8. 議論

本システムの主な課題について説明する。

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、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。閾値の調整で解決は可能だが、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いきたい。ワークショップでは、プレイマット上にユーザの腕やオブジェクトが多く配置されていた。現状の実装では腕やオブジェクトの位置認識をしていないため、インタラクティブ性を高めるために、toioのセンサ等を流用して、腕やオブジェクトの位置検出機能をスマートに導入していきたい。

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] Ryo Suzuki, Clement Zheng, Yasuaki Kakehi, Tom Yeh, Ellen Yi-Luen Do, Mark D. Gross, and Daniel Leithinger. 2019. ShapeBots: Shape-changing Swarm Robots. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 493–505. <https://doi.org/10.1145/3332165.3347911>
- [2] Ken Nakagaki, Joanne Leong, Jordan L. Tappa, João Wilbert, and Hiroshi Ishii. 2020. HERMITS: Dynamically Reconfiguring the Interactivity of Self-propelled TUIs with Mechanical Shell Add-ons. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface

- Software and Technology (UIST '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 882–896. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415831>
- [3] Lawrence H. Kim and Sean Follmer. 2019. SwarmHaptics: Haptic Display with Swarm Robots. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 688, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300918>
- [4] Alexandra Ion, Robert Kovacs, Oliver S. Schneider, Pedro Lopes, and Patrick Baudisch. 2018. Metamaterial Textures. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 336, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173910>
- [5] Rei Sakura, Changyo Han, Keisuke Watanabe, Ryosuke Yamamura, and Yasuaki Kakehi. 2022. Design of 3D-Printed Soft Sensors for Wire Management and Customized Softness. In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 192, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519906>
- [6] Yuhan Hu and Guy Hoffman. 2020. Using skin texture change to design emotion expression in social robots. In Proceedings of the 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI '19). IEEE Press, 2–10.
- [7] Yuhan Hu, Isabel Neto, Jin Ryu, Ali Shtarbanov, Hugo Nicolau, Ana Paiva, and Guy Hoffman. 2022. Touchibo: Multimodal Texture-Changing Robotic Platform for Shared Human Experiences. In Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '22 Adjunct). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 68, 1–3. <https://doi.org/10.1145/3526114.3558643>
- [8] Ryosuke Nakayama, Ryo Suzuki, Satoshi Nakamaru, Ryuma Niiyama, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. 2019. MorphIO: Entirely Soft Sensing and Actuation Modules for Programming Shape Changes through Tangible Interaction. In Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference (DIS '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 975–986. <https://doi.org/10.1145/3322276.3322337>
- [9] Ken Nakagaki, Sean Follmer, and Hiroshi Ishii. 2015. LineFORM: Actuated Curve Interfaces for Display, Interaction, and Constraint. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '15). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 333–339. <https://doi.org/10.1145/2807442.2807452>
- [10] Hayes Solos Raffle, Amanda J. Parkes, and Hiroshi Ishii. 2004. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 647–654. <https://doi.org/10.1145/985692.985774>