

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

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。また、テクスチャの形状や機能を調整して造形することで、触覚的／視覚的な刺激を与える研究も行われている。本研究では、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。本システムでは、複雑な機構や細かな制御を必要としないテクスチャに着目した。テクスチャを備えた小型ロボットの動きだけで情報提示の幅を広げることを目指す。評価実験では、力学的観点から本システムの性能を検証を行った。さらに、ユーザ評価を通して、小型ロボットの形状と動きがユーザにどのような印象を与えるのかを調査した。

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 [12][5][7][11] 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、複数台が協調動作して複雑なタスクを達成する特徴がある。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、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 [3] や、ロボットに空気圧制御を用いてテクスチャを付与する試み [2][1] が提案されたが、小型ロボットが複数のテクスチャを使い分け、ユーザに情報提示するような研究について、あまり行われてこなかった。

2. 関連研究

本研究に関連する事例として、「小型ロボットで生活等のサポートをする研究」、「多様な質感や機能を持つテクスチャを造形する研究」、「ロボットなどの表面形状をアクチュエータで変化させて情報提示する研究」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

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 [12] 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事例として、プロジェクトで投影したマップ上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の高さを変形させて表現した。

Le ら [5] は、群ロボットを用いたユーザインタフェース「Zoids」を提案した。小型ロボットを無線通信で制御し、プロジェクトと組み合わせて利用する。プロジェクトで投影したグラフ上で、本体が点や線の役割を担うことでデータをプロットしたり、机上のモノを物理的に押して、手元に運ぶ応用例を提案した。

Nakagaki ら [7] 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、物理的な機構で多様な動きや入力を行う「HERMITS」を提案した。

Suzuki ら [11] 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。これにより、教育への応用やゲーム体験のリアリティの向上の可能性を示した。

Kim ら [4] 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

^{†1} 公立はこだて未来大学

^{a)} g2123003@fun.ac.jp

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、被験者の受け取る感情等を調査した。

Liら [6] 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、群ロボットを操縦して自由に視点を切り替える等の手法を提案した。これにより、ユーザーの存在感や学習の理解が高まる等の結果を示した。

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 [3] 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 [13] は、3Dプリンタに物理的な振動を付与し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ーを取り付け、音を再生しながら造形を行った。ビルドプレートを物理的に振動させることで、G-Codeによる制御が難しい微細なテクスチャを実現した。これにより、造形物に撥水性を発現させたり、透明樹脂をすりガラスのように曇らせる光学的特性の付与を可能にした。

2.3 デバイスの表面形状を変化させるインタラクション

Sakuraら [10] 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。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の実現可能性を示した。

Huら [2] 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利用例を提案した。

Huら [1] 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。この研究では、動物の皮膚の変化（鳥肌・逆立つ毛・フグの針等）が感情表現することに注目している。

Oosterhoutら [9] は、温度調節を行うためのダイヤルであるサーモスタットに焦点を当て、その形状を変化させる

視覚的フィードバックや、ダイヤルを回転させる力学的なフィードバックをユーザーに与える「Ripple Thermostat」を提案した。

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、ユーザーのソフトロボットに対する動作や変形を記録できる。記録した情報を元にロボットを駆動する例示プログラミングのような利用例を示した。

2.4 本研究の独自性

本研究の独自性として、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、動きと形状の組み合わせを変化させることで、ユーザーに対して多様な情報提示を行うことができる点である。また、複数のテクスチャを容易に変更できる仕組みを設けることで、目的や状況に応じてその機能を柔軟に変更できる。

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、ユーザーに触覚的／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。これらの特性を用いて、ユーザーに柔軟に提示する情報を切り替える。

実際にシステムを使用している様子を図1に示す。この利用例では、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ー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。



図1 システム利用例

3.2 システム構成

最初に、システム構成図を図2に示す。

本システムでは、小型キューブ型ロボットの 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 に固定するためのテクスチャマウントから構成される。

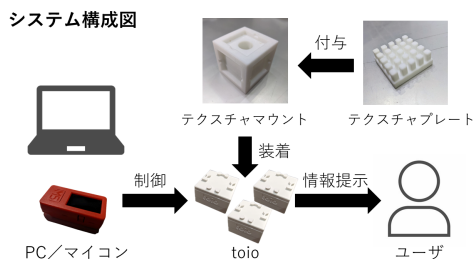


図 2 システム構成図

4. 実装

本研究では、SONY が販売する小型キューブ型ロボットの toio を使って実装した。まず、toio に関する基本的な説明を行い、toio に装着するテクスチャプレートとテクスチャマウントについて説明する。最後に、ホストコンピュータや制御用ソフトウェア，動作例を説明する。

4.1 toio

toio 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ーに情報提示を行う小型ロボットとして利用した。

toio は、31.8mm × 31.8mm × 24.3mm と小さいキューブ状で、2つの車輪が内蔵されている（図 3）。何も載せない状態で、350mm/s の直進、1500° /s の回転が可能で、PC 等から Bluetooth 経由で制御する。また、キューブ上面に様々なモノを載せる想定で設計されており、200g まで積載して走行できる。裏面は、スイッチが内蔵されていて、キューブ上面を押し込むことで、本体をスイッチのように扱えることができる。付属のプレイマットは、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、toio 同士の位置関係の把握ができる。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なる。他にも、磁気センサや加速度センサ、圧電スピーカー、LED ランプが内蔵されており、幅広い機能を使用できる。

このように、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点から、toio を用いてプロトタイプを構築することにした。

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

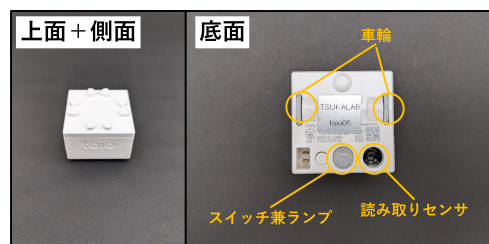


図 3 toio の外観（上面、裏面）

付与するためのマウント部品のことを指す。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。

toio とテクスチャマウントと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は、上面に設けた穴から指や棒で押し出すことで簡単に外せる設計にした。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はめ込む窪みを用意した。この窪みの両端には、小さな凹みがついていて、爪や工具を掛けることで簡単にテクスチャプレートを外せる。さらに、テクスチャマウント裏面の淵には、床に干渉しない程度の円柱を 2 つ取り付けた。これは、toio が停止する際に、テクスチャマウントの重みで前後に揺れ動く現象を抑えるものである。

図 5 にテクスチャプレートを着脱する様子を示す。テクスチャプレートの裏面には、マスキングテープが張り付けてあり、窪みとテクスチャプレートの間で板バネの役割を持たせることで、安定して固定できるように配慮した。

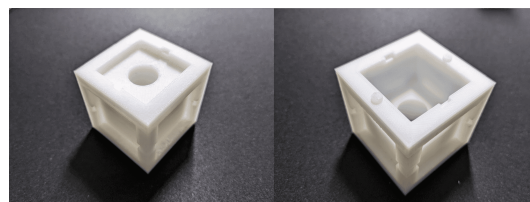


図 4 テクスチャマウントの外観（上面、底面）

4.3 テクスチャプレート

テクスチャプレートとは、様々なテクスチャを備えたプレート状のアタッチメントである。触覚刺激を与えるテクスチャ 3 種（基本テクスチャ、高さ変更テクスチャ、フレキシブルテクスチャ）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。テクスチャは、3D プリンタ（Zortrax M200）を用いて造形した。

4.3.1 基本的なテクスチャ

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）。フィラメントには ABS 素材を用いた。柱の形状として、角ばった角柱・尖った円錐・丸まった円柱の 3 種を用意した。角柱を基本形として、円錐を攻撃的、円柱を温和的といった印象を与える意図で

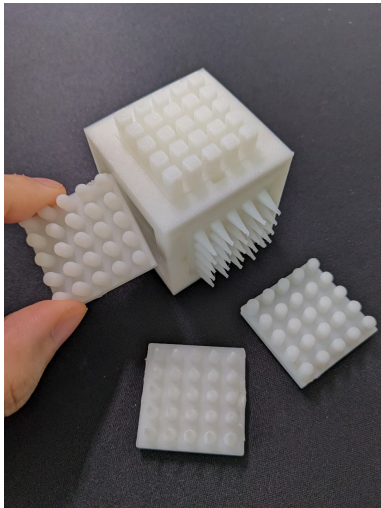


図 5 テクスチャプレートの装着例

作成した。

柱の本数は、事前に 2×2 から 6×6 まで造形して、適切な密度を検証した (図 7)。 6×6 では、柱が細く破損しやすい問題があり、今回の造形環境では不適切と考えた。よって、造形が安定している中で、最も細かい 5×5 を基本形として採用した。

プレート部分の寸法は、全て $31.8\text{mm} \times 31.8\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 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。

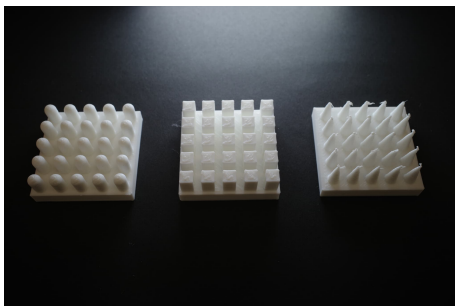


図 6 基本テクスチャ (円柱・角柱・円錐)

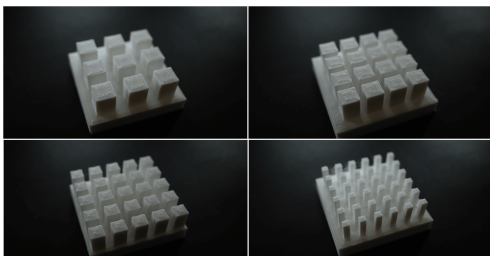


図 7 テクスチャ密度の予備検証

4.3.2 高さの異なるテクスチャ

角ばった角柱のテクスチャに対して、高さのパラメータを様々に変化させたバリエーションを試作した (図 8)。これらは、ユーザ側から小型ロボットに触れることを前提に設計したもので、主にテクスチャマウント上面に付与することを想定した。toio の説明でも述べたように、キューブ本体はスイッチのように扱えるため、このテクスチャプレートを使用することで、スイッチの押しやすさや押し心地の変化が期待できる。

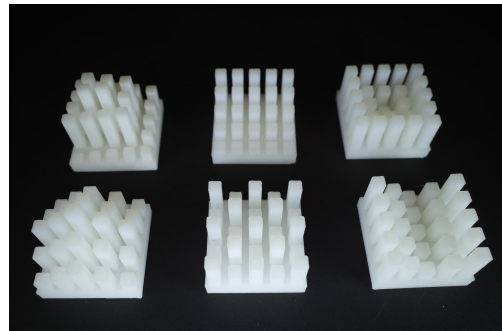


図 8 角柱に対して高さのパラメータを様々に変化させた例

4.3.3 フレキシブルテクスチャ

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。この節では、TPU 素材を用いたフレキシブルフィラメントを使用したテクスチャプレートについて述べる。

まず、フィラメントとして Polymaker TPU95 を利用して基本テクスチャと同様の形状を造形した。しかし、これらを手で触って見たところ、想定よりも柔らかさに乏しかった。そこで、柱の根元を細くなるようにモデルを改良したうえで、再度造形した。この結果、テクスチャに触れた際に曲がりやすく、柔らかさを感じることができた。

一方、TPU 素材の特性上、テクスチャ間に意図しない糸 (糸引き) が発生してしまい、見栄えが悪くなったり、造形中にノズルが物理的に柱に干渉して形状が不安定になった。そこで、フィラメントをより柔らかく流動性の高い Polymaker TPU90 に変え、ノズルサイズを 0.4mm から 0.2mm に変更した。さらに、リトラクション (ノズルを移動する際にフィラメントを引き戻す) の量を上げたり、ノズル温度を下げる等の調整をした。この設定で造形した結果を図 10 に示す。糸引きや造形精度が大幅に改善され、より柔らかい印象となった。

4.3.4 ミラーテクスチャ

視覚的な刺激を与える例としてミラーテクスチャを試作した (図 11)。ABS 樹脂でプレート上に斜面を造形した後、ミラーシールを張り付けた (図 11)。

ミラーテクスチャを備えた小型ロボットが動き回することで、環境光を反射してユーザの気を引いたり、望ましくない作業を邪魔できると考える。

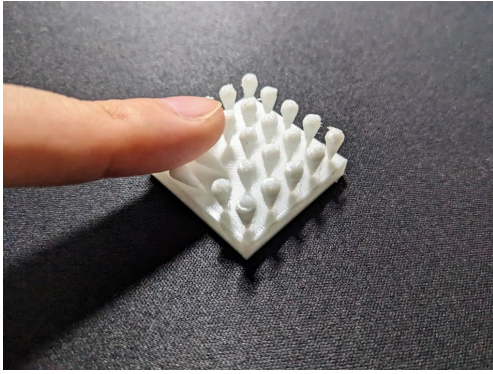


図 9 TPU95 素材で造形したテクスチャプレート

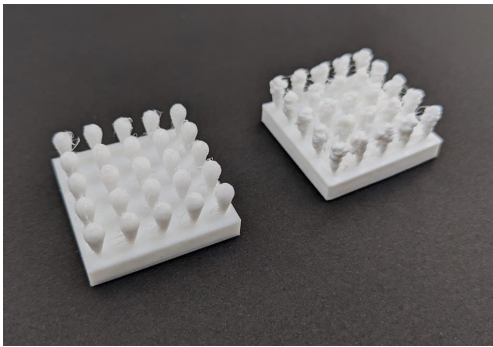


図 10 左：TPU90 (改善後), 右：TPU95 (改善前)

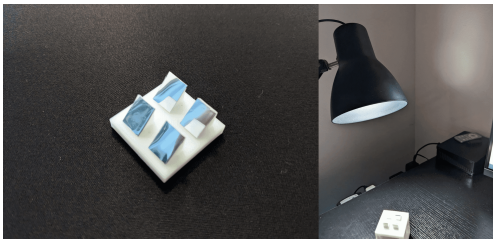


図 11 ミラーテクスチャの外観, 反射光が壁に投影される様子

4.4 ホストコンピュータ

本研究では、複数台の toio とホストコンピュータを BLE (Bluetooth Low Energy) 通信を介して制御する。toio の制御方法は複数あるが本システムでは、複数台制御に適した PC を用いる方法と、センサ等の拡張性に優れた ESP32 マイコン (M5StickC Plus) で制御する方法の 2 種類を利用する。

最初に、PC を用いた制御方法について説明する。toio を制御できる台数の上限は、ホストコンピュータの性能に依存する。そのため、複数台同時に toio の操作をする場合は、PC 上でプログラムを実行し、BLE 通信で制御する必要がある。toio 公式からは JavaScript 用のライブラリ toio.js が提供されているが、Windows11 に標準で搭載される Bluetooth ドライバに対応していないため、外付けの Bluetooth ドングル (USB-BT40LE) を用いた。^{*1}プログラムの記述には、Microsoft 社から提供されている

^{*1} ドングルにアクセスするため、Zadig でドライバのインストールと USB ポートの書き換えをした。

Visual Studio Code を用いて開発を行った。自身の開発環境 (Windows11 Home, Surface Laptop4) では、最大で 5 台の toio に接続できた。

次に、ESP32 マイコンを用いた制御方法について説明する。ESP32 マイコンは、標準で BLE 通信機能を搭載するため、toio と通信して制御することができる。特に M5Stack 社が提供する M5StickC Plus は、センサやアクチュエータといった外部の電子部品を用いて機能を拡張するのに適している。ESP32 マイコンを使ったプログラムの記述には、Arduino IDE を用いた。

4.5 動作例

このシステムでは、toio の様々な動き (直線/回転/振動) を活用することでユーザへの情報提示を行う。toio に付属するプレイマットを併用することで、toio 本体を指定座標へ移動させたり、他の toio の位置を把握しながら自身の行動を決め、処理を容易に実装できる。

これまでに、toio が物理的にユーザの腕等に接触し、触覚刺激を与えることに焦点を当てた実装をした。代表的な動きとして、突く/擦る等 (図 12) がある。テクスチャマウントには、側面に 4 つのテクスチャを付与できるため、toio の回転で使用するテクスチャを切り替えることができる。なお、toio は 2 輪駆動であるため、テクスチャプレートを設置する場所に応じて、突く (前後移動) と擦る (左右移動) のどちらかしかできない制約がある。また、周期的に toio を回転させて擦る表現も試したが、テクスチャマウントの角がユーザに干渉する問題がある。今後は、テクスチャマウントの角を面取りするなどして、円柱に近づける工夫が必要である。

また、先端が角ばった四角柱、丸まった円柱、尖った円錐のテクスチャプレートを複数台の小型ロボットに付与し、順番にユーザを刺激する動きを試作した (図 13)。最初は、丸まった円柱のテクスチャを備えた小型ロボットが優しく刺激を行うが、時間が経過していくにつれて刺激に用いるテクスチャが鋭く変化していき、最後は尖った円錐でユーザの腕を激しく突く。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様子をテクスチャと動作のパラメータ (動作速度: 速く/遅く, 振動周期: 長く/短く) の組み合わせで表現する。

5. 評価実験

本章では、性能評価とユーザ評価について述べる。

5.1 性能評価

5.1.1 目的

本システムで作成した筐体を toio に装着した状態で駆動し、ユーザに触覚刺激を与える力がどの程度なのかを力学的観点から調査する。

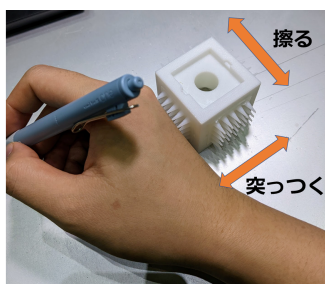


図 12 突く／擦る動作例

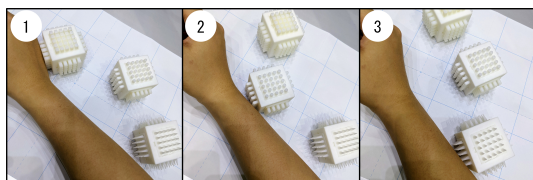


図 13 順番に刺激を与える動作例

5.1.2 手法

図 14 に示すように、テクスチャマウントと 5 つのテクスチャプレートに toio に装着し、8cm 離れた位置からフォースゲージ (AD-4932A-50N) に向けて走行・衝突させた。ここで、衝突した瞬間の力を計測した。形状は、3 種類の基本的なテクスチャを対象とした。toio は、ライブラリ上で 8~115 の範囲で速度指定を行えるため、10 / 50 / 100 の 3 条件で各 5 回検証した。

このように、形状 3 種×速度 3 種×各 5 回の計 45 個のデータを収集した。

なお、プレイマットとフォースゲージをマスキングテープで固定し、計測中に位置が動かないよう配慮した。

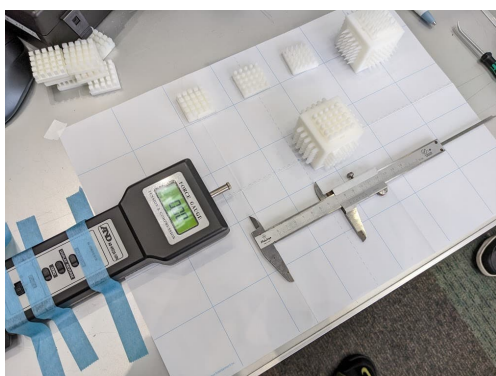


図 14 性能評価実験の様子

5.1.3 結果

性能評価実験で得た結果を図 15 に示す。

5.1.4 考察

衝突した瞬間の力の大きさの平均値 (図 15) では、すべての速度で角柱が一番大きく、円柱と円錐で大きな差が見られなかった。原因として、角柱は円柱と円錐に比べ接地面が広く、計測部を安定して押し込むことができたと考えられる。

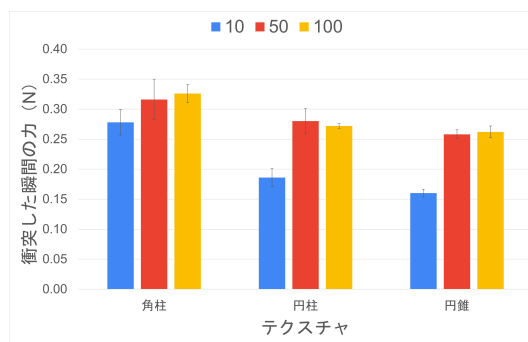


図 15 衝突時の力の実験結果。平均値と標準偏差を示す。

また同じ形状で速度を変えた場合、速度 10 が最も力が弱く、50 と 100 で大きな差はなかった。こうした傾向は、特に円柱／円錐のテクスチャで顕著であった。

指で軽く押し力の大きさが、0.3N 程度なので全体的に押し込む力が弱いことがわかる。

5.2 ユーザ評価

5.2.1 目的

テクスチャの形状と小型ロボットの動作を組み合わせた複数の表現をユーザに体験してもらい、主観的な印象を調査する。得られた結果の分析と考察を行い、システムの改良や応用例の構築に役立てることを目的とする。

5.2.2 手法

本システムで被験者に対して触覚的／視覚的な刺激を与えたのち、SD 法を元に作成した印象評価アンケートに回答させた。被験者は、大学生 6 名を対象とした。

刺激として、形状 (円柱／円錐)・速度 (遅く／速く)・動作 (突く／擦る) の組み合わせで計 8 種類のパターンを用意した。次に、印象評価項目について説明する。小型ロボットの外見や動作がユーザの印象にどのような影響を及ぼすかを測るため、事前に 8 組の形容詞対を選定した。具体的には、「硬い：柔い」、「派手な：地味な」、「積極的な：消極的な」、「強い：弱い」、「明るい：暗い」、「余裕がある：切迫している」、「可愛い：憎い」、「好き：嫌い」である。SD 法を用いて、5 段階評価で回答させた。最後に自由記述欄を設け、コメントや感想等を記入させた。

順序効果に配慮し、各パターンの提示順序を被験者ごとに入れ替えた。また、各パターンの提示直後に対応する印象評価項目に回答させた。なお、刺激を提示する際には、机にプレイマットを敷き、被験者に指定した位置に腕を置いてもらった。小型ロボットが移動して、腕に触覚刺激を与えて来ることを事前に教示してから実験を開始した。

ユーザ評価実験の様子を図 16 に示す。

5.2.3 結果と考察

被験者 6 名に対して各パターンの印象を 5 段階で回答させ、データを収集した。例えば、「硬い：柔い」の場合、1 に近いほど硬い印象、5 に近いほど柔い印象となる。中間の 3

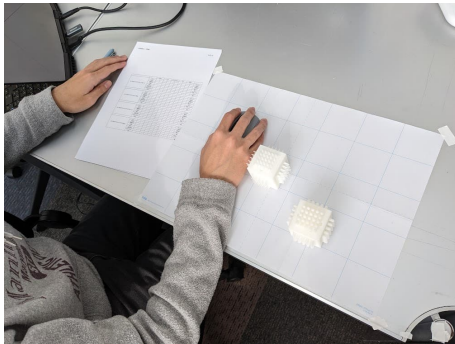


図 16 ユーザ評価実験の様子

を「どちらでもない」とした。特に変化の大きかった4つの印象評価項目の平均値と各パターンの関係をまとめた。

形状と動作の組み合わせで被験者の印象が変化することがわかった。特に変化の大きかった「地味な：派手な」、「余裕のある：切迫している」、「弱い：強い」、「憎い：可愛い」の4項目について、形状・速度・動作ごとに説明する。

表1では、形状に着目して「円柱」と「円錐」の観点からまとめる。円柱／円錐で類似する印象として、余裕がある(3.9 / 4.2)、弱くも強くもない(3.1 / 3.5)という結果を得た。一方、円柱／円錐で差の大きかった印象として、「地味：派手」では(2.7 / 3.5)となり、円錐の方がやや派手な傾向であった。「憎い：可愛い」では、(3.9 / 3.0)となり、円柱の方が可愛いという傾向であった。自由記述では円錐に対して、「尖っていると少し痛い」、「威圧的に感じて、悪魔みたい」、「ヤマアラシが怒っているように見える」等の記述が見られた。

表2では、速度に着目して「遅く」と「速く」の観点からまとめる。遅く／速くで類似する印象として、憎くも可愛くもない(3.5 / 3.3)という結果を得た。一方、遅く／速くで差の大きかった印象として、「地味：派手」では(2.5 / 3.7)となり、速くの方が派手な傾向であった。「余裕のある：切迫している」では、(3.6 / 4.4)となり、速くの方が切迫した印象を与えるという傾向であった。「弱い：強い」では(2.9 / 3.6)となり、速くの方がやや強い印象を与える傾向にあった。自由記述では、速いに対して、「速くなると、急かされているように感じた」等の記述が見られた。

表3では、動作に着目して「突く」と「擦る」の観点からまとめる。突く／擦るで類似する印象として、地味でも派手でもない(3.3 / 2.9)、切迫している(4.1 / 4.0)、やや可愛い(3.2 / 3.6)という結果を得た。一方、突く／擦るで差の大きかった印象として、「弱い：強い」では(3.6 / 2.9)となり、突くの方が強い傾向であった。自由記述では、「擦る動作は、擦り寄る感じがして甘えているみたい」等の感想が見られた。

以上より、形状・速度・動作のパラメータの組み替えて、ユーザに異なる印象を提示できることがわかった。

表 1 形状による印象変化, 平均値と標準偏差を示す.

	円柱	円錐
地味な：派手な	2.7(0.81)	3.5(0.47)
余裕のある：切迫している	3.9(0.63)	4.2(0.38)
弱い：強い	3.1(0.86)	3.5(0.36)
憎い：可愛い	3.9(0.36)	3.0(0.17)

表 2 速度による印象変化, 平均値と標準偏差を示す.

	遅く	速く
地味な：派手な	2.5(0.61)	3.7(0.32)
余裕のある：切迫している	3.6(0.47)	4.4(0.19)
弱い：強い	2.9(0.66)	3.6(0.49)
憎い：可愛い	3.5(0.61)	3.3(0.43)

表 3 動作による印象変化, 平均値と標準偏差を示す.

	突く	擦る
地味な：派手な	3.3(0.74)	2.9(0.75)
余裕のある：切迫している	4.1(0.48)	4.0(0.59)
弱い：強い	3.6(0.49)	2.9(0.66)
憎い：可愛い	3.2(0.41)	3.6(0.54)

6. 議論

本システムの主な課題について説明する。

1つ目の課題として、プロトタイプの開発で用いた toio は、触覚刺激を与える力が乏しいといった問題がある。筐体が小さく高トルクの DC モーターや大容量 Lipo バッテリーの搭載が困難である。そのため、衝突時の力強い触覚刺激の提示が難しいと考えられる。

2つ目の課題として、センシング機能が不足する問題があり、腕の位置や物体の検知ができない。現状は、物体の位置が変化しない前提で開発を進めており、座標を直接入力してプロトタイプを実装した。先行研究では、天井等にカメラとプロジェクタを設置して、ユーザの動きや、机上の環境、データプロットの位置を認識していた [12][5][11]。この手法は、複数の小型ロボットの位置を認識し、プロジェクタと併用することで多彩な表現ができる。一方で、小型ロボットが多様なフィールドで活動できる特性を削いでしまう。また、小型ロボットにカメラを装着する方法 [6] では、各々の視点から映像を確認できるため、ユーザが直接操作したり、障害物が多い場合に有効な手段であった。しかし本研究では、複雑かつ大掛かりな部品を組み込むことは避けたいため、それぞれの手法のメリットとデメリットを考慮し、慎重に検討して改善を図る。

3つ目の課題として、システムの具体的な応用例が乏しい問題がある。実装した例では、小型ロボットがユーザの腕を触覚的に刺激し、通知をするような利用例を紹介した。今後は、テキストチャットと小型ロボットを活用した応用例を増やす必要がある。例えば、食事におけるマナーの注意を促したり、3D プリンタの稼働状況を監視し、エラーやミスが

発生した際に、動きでユーザに通知する等、様々なシチュエーションやフィールドでの活用方法が考えられる。

7. おわりに

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、ユーザに触覚的／視覚的な刺激を与えることで情報提示を行う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（基本的なテクスチャ・高さの異なるテクスチャ・フレキシブルフィラメントを使用したテクスチャ・ミラーテクスチャ）の試作と動きの考察・実装をした。

さらに性能評価では、ユーザに触覚刺激を与える想定で力学的な観点から調査を行い、その分析をした。ユーザ評価では、テクスチャの形状と小型ロボットの動きを組み合わせ、ユーザに対して触覚的／視覚的な刺激を与える実験を行い、印象の調査・分析をした。

本システムの課題で説明したように、現状のシステムには複数の技術的な課題が残っているため、その改善に取り組む。また、評価実験で得られた結果やコメントをもとにシステムを見直し、より効果的な情報提示手法や応用例を探っていく。

謝辞

本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Hu, Y. and Hoffman, G.: Using skin texture change to design emotion expression in social robots, ACM, Proceedings of HRI2019, pp. 493–505 (2019).
- [2] 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, ACM, Proceedings of UIST2022, pp. 1–3 (2022).
- [3] Ion, A., Kovacs, R., Schneder, S., O., Lopes, P. and Baudisch, P.: Metamaterial Textures, ACM, Proceedings of CHI2018, pp. 336–348 (2018).
- [4] Kim, H., L. and Follmer, S.: SwarmHaptics: Haptic Display with Swarm Robots, ACM, Proceedings of CHI2019, pp. 1–13 (2019).
- [5] Le, M., H., K., Parsaei, A., Fekete, J.-D., Pierre, D. and Follmer, S.: Zooids: Building Blocks for Swarm User Interfaces, ACM, Proceedings of UIST2016, pp. 97–109 (2016).
- [6] 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, ACM, Proceedings of CHI2022, pp. 1–14 (2022).
- [7] Nakagaki, K., Leong, J., Willbert, Henrique, J. and Hiroshi, I.: HERMITS: Dynamically Reconfiguring the Interactivity of Self-Propelled TUIs with Mechanical Shell Addons, ACM, Proceedings of UIST2020, pp. 151–156 (2020).
- [8] 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, ACM, Proceedings of DIS2019, pp. 975–986 (2019).
- [9] Oosterhout, van, A., Alonso, Bruns, M. and Jumisko-Pyykko, S.: Ripple Thermostat: Affecting the Emotional Experience through Interactive Force Feedback and Shape Change, ACM, Proceedings of UIST2018, pp. 1–12 (2018).
- [10] Sakura, R., Han, C., Watanabe, K., Ryosuke, Y. and Kakehi, Y.: Design of 3D-Printed Soft Sensors for Wire Management and Customized Softness, ACM, Proceedings of CHI2022, pp. 1–5 (2022).
- [11] Suzuki, R., Ofek, E., Sinclair, M., Leithinger, D. and Gonzalez-Frando, M.: HapticBots: Distributed Encountered-type Haptics for VR with Multiple Shape-changing Mobile Robots, ACM, Proceedings of UIST2021, pp. 1269–1281 (2021).
- [12] Suzuki, R., Zheng, C., Kakehi, Y., Yeh, T., Do, E. Y.-L., Gross, M. D. and Leithinger, D.: ShapeBots: Shape-changing Swarm Robots, ACM, Proceedings of UIST2019, pp. 493–505 (2019).
- [13] 将来荒井, 浩也田中: 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 4DF2020, pp. 19–22 (2020).