

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

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。我々はこれまで、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してきた。本研究では、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ツールを構築した。本ツールを活用することで、探索的に刺激や動きを調整し、効果的なアプリケーションを模索する。

1. はじめに

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] 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、拡張性に欠ける問題があった。著者らはこれまでに、小型ロボットに交換可能なテクスチャを組み合わせて、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した [10]。

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 (図 1)。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ツールを構築した。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たり、仮想空間上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。また、仮想空間上でもテクスチャプレートを手軽に変更できる。さらに、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。

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。

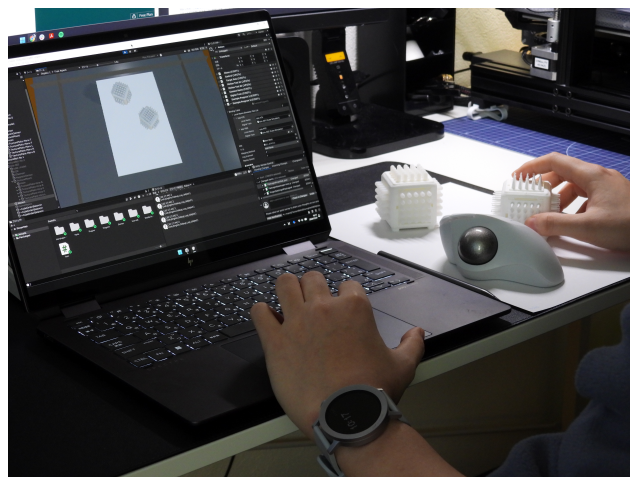


図 1 システム利用例

2. 関連研究

小型ロボットを活用したインタラクションの研究として、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。Kim ら [6] 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、被験者の受け取る感情等を調査した。多様な質感や機能を持つテ

^{†1} 公立はこだて未来大学

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

クスチャを造形する研究として、Ion ら [8] 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、部屋に入っただけで怖い等の情報を提示できる。表面形状とロボットを組み合わせた研究として、Hu ら [9] は空気圧で形状変化させることでロボット自身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、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）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。さら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動き等を調整／シミュレーションすることで、応用例の探索を支援する。

3. 提案

本章では、研究目的と提案システムの概要・構成について説明する。

3.1 研究目的

本研究の目的は、小型ロボットのテクスチャと動きを用いてユーザに視覚的／触覚的な刺激を提示するシステムの応用例の探索を支援することである。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ツールを開発する。このツールをワークショップ等で運用することで、研究目的の達成を図る。

3.2 小型ロボットとテクスチャを組み合わせた情報提示

ここでは、我々のこれまでの研究 [10] について簡潔に紹介する。複数台の小型ロボットに交換可能なテクスチャを組み合わせることで、複雑な制御や機構を利用せずに視覚的／触覚的な情報提示を行うシステムを提案した（図 2）。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の面を切り替えたり、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（図 3）。

3.3 提案システム

本システムではまず、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する。仮想空間のロボットは現実世界のロボットと同期して、移動方向／速度で制御したり、絶対座標を指定して移動させることができる。ま

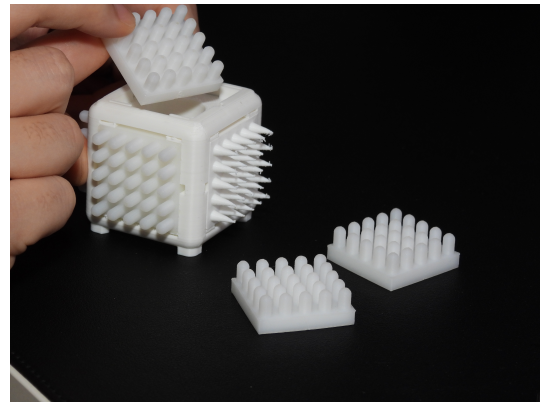


図 2 テクスチャプレートの装着例

た、面毎のテクスチャを GUI から手軽に切り替えることもできる。さらに、ロボットの動きを記録／再生する機能を備えており、例示プログラミングのような手法で小型ロボットの制御／シミュレーションを行うことができる（図 4）。

4. 実装

本章では、本研究の前提となる基本システムと、ホストコンピュータ上で動作するデジタルツインシステムを中心に実装について紹介する。図 5 にシステムの流れを示す。

4.1 基本システム

本研究では、SONY が販売する小型キューブ型ロボットの toio^{*1} に 3D プリンタを用いて作成したテクスチャプレートとテクスチャマウントを装着して筐体を構築している。toio を制御するホストコンピュータとしては、PC（HP Spectre x360 14-eu0007TU, Windows 11 Pro）を使用した。toio は位置センサ／物理スイッチ／加速度センサ等を搭載しており、専用のプレイマットと組み合わせることで絶対位置を用いた制御ができる点が特徴である。

4.2 デジタルツインシステム

デジタルツインシステムの開発環境としては、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、C# プログラムから Bluetooth Low Energy（BLE）を介した無線制御が可能である。豊富なライブラリやアセットが用意されており、現実空間の複数台の toio の移動や、toio へのインタラクションの検出（持つ／置く、押し込む等）等を仮想空間と同期しながら行うことができる。さらに、前述した toio の位置センサとプレイマットを利用することで、現実世界の toio の絶対位置や向きを検出し、仮想世界にリアルタイムに反映させることができる。

さらに、基本システムで利用しているテクスチャマウン

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

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

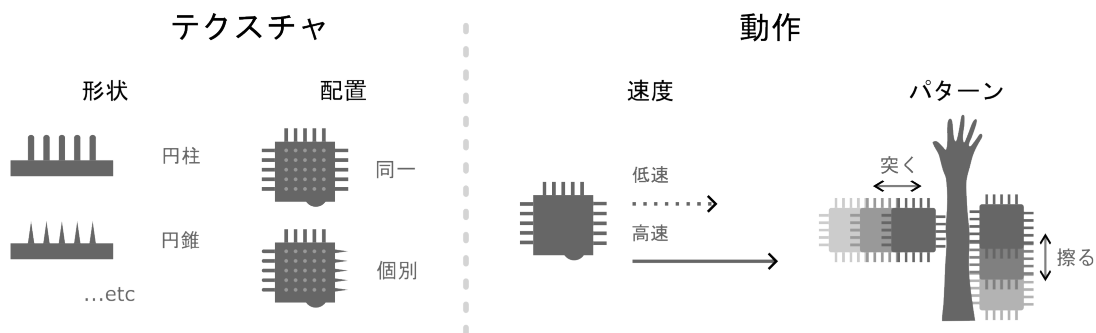


図 3 本研究で変更可能なパラメータ

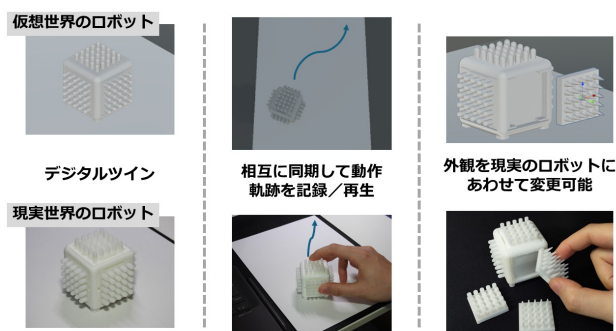


図 4 提案システムの概要

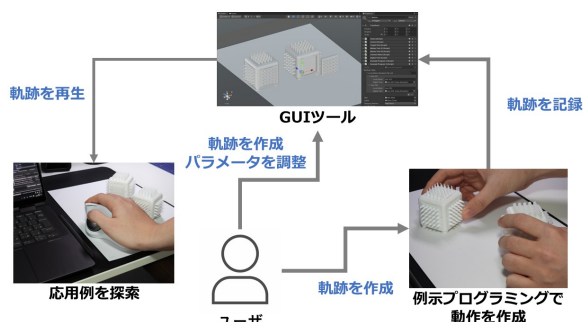


図 5 システムの流れ

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、GUI 上で手軽に交換できる機能を実装した (図 6)。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 (図 7)。

また、ロボットの動きを設計するための手段として、例示プログラミング機能を実装した (図 8)。キーボード入力等で記録状態を開始すると、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。ここでは、現実空間のロボットを手で持って動かしてもよいし、仮想空間のロボットを PC 上で操作してもよい。両者の動作は自動的に同期して記録される。記録状態を終了後に、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。なお、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、単純に記録した座標に移動させるだけではなめらかな動きが再現できないため、(1) 記録時に一定距離を移動する毎に座標を記録する、(2) 軌跡から移動平均を計算して再生時の移動指示を減らす、といった工夫も行っている。(1) については、次の座標を記録する際の最小距離を閾値として設けており、GUI から手軽に調整できるように配慮した。閾値を引き上げると、再生時に軌跡の再現性は減少するが、よりなめらかに移動できる。

加えて、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、マット上であれば自由に配置することができ、時間経過と共に移動させることも可能である。

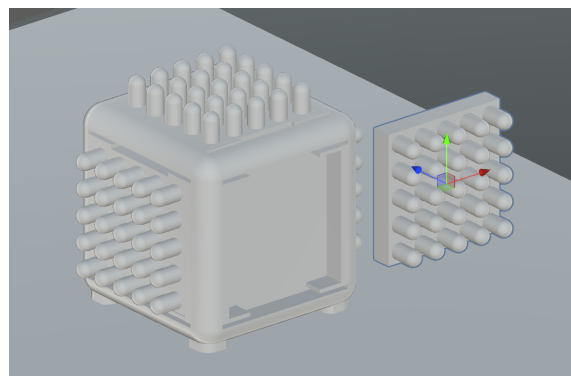


図 6 GUI 上でテクスチャプレートを交換している様子

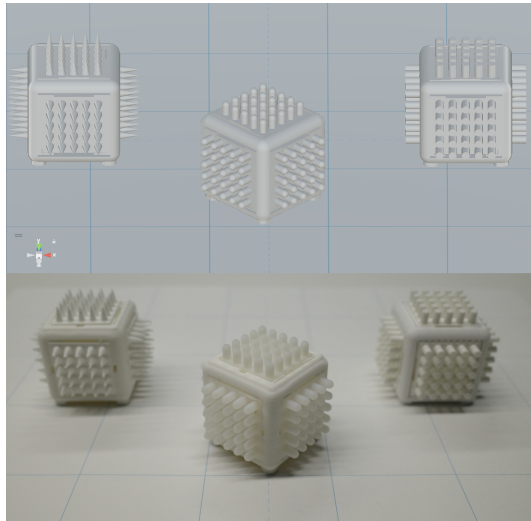


図 7 3D モデルを仮想空間内に反映した様子
(上図：仮想世界，下図：現実世界)

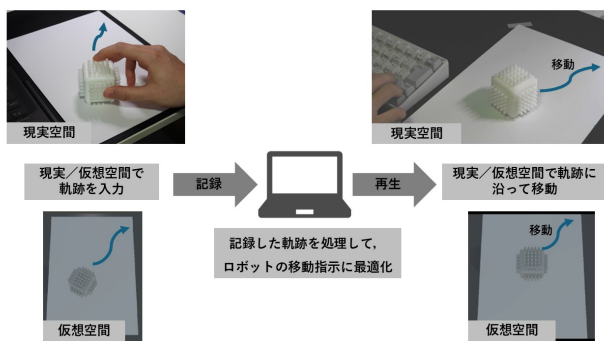


図 8 例示プログラミングによる移動軌跡の記録と再生

5. まとめと今後の展望

本研究では，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ツールを構築した．本ツールを活用することで，探索的に刺激や動きを調整し，効果的にアプリケーションを構築できると考えている．今後は，より多様なテクスチャ（フレキシブル素材のテクスチャやミラーテクスチャ等）の挙動を再現したり，動作のループ／複数台の同期等の制御構造に対応することで，効率的な試行錯誤を支援する．また，本ツールを用いたワークショップ等を通して効果的なアプリケーションを模索していく．

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, ACM, Proceedings of UIST2019, pp. 493–505 (2019).
- [2] Goc, M. L., Kim, L. H., Parsaei, A., Fekete, J.-D., Dragicevic, P. and Follmer, S.: Zooids: Building Blocks for Swarm User Interfaces, ACM, Proceedings of UIST2016, pp. 97–109 (2016).
- [3] Nakagaki, K., Leong, J., Tappa, J. L., Wilbert, J. and Ishii, H.: HERMITS: Dynamically Reconfiguring the Interactivity of Self-Propelled TUIs with Mechanical Shell Addons, ACM, Proceedings of UIST2020, pp. 151–156 (2020).
- [4] Suzuki, R., Ofek, E., Sinclair, M., Leithinger, D. and Gonzalez-Franco, M.: HapticBots: Distributed Encountered-type Haptics for VR with Multiple Shape-changing Mobile Robots, ACM, Proceedings of UIST2021, pp. 1269–1281 (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, ACM, Proceedings of CHI2022, pp. 1–14 (2022).
- [6] Kim, L. H. and Follmer, S.: SwarmHaptics: Haptic Display with Swarm Robots, ACM, Proceedings of CHI2019, pp. 1–13 (2019).
- [7] Zhao, Y., Kim, L. H., Wang, Y., Goc, M. L. and Follmer, S.: Robotic Assembly of Haptic Proxy Objects for Tangible Interaction and Virtual Reality, ACM, Proceedings of ISS2017, pp.82–91 (2017).
- [8] Ion, A., Kovacs, R., Schneider, O. S., Lopes, P. and Baudisch, P.: Metamaterial Textures, ACM, Proceedings of CHI2018, pp. 336–348 (2018).
- [9] Hu, Y. and Hoffman, G.: Using skin texture change to design emotion expression in social robots, ACM, Proceedings of HRI2019, pp. 493–505 (2019).
- [10] 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ピューティングシンポジウム 2023, pp. 262-269 (2023).