

自己表現のためのモジュール型ソーシャルロボットの開発基盤の構築 — 身体で操作するモジュールロボットによる自分だけのロボット —

1. 背景

デジタル空間においては、ユーザが自らの好みや理想の姿をアバターとして自由にデザインし、それを介して他者とコミュニケーションを行う文化が広がっている。VRChat などのメタバース空間では、性別や容姿を自在に変化させたアバター、あるいは人間以外の姿をしたアバターも広く用いられており、自己表現の自由度の高さとその重要性が示されている。こうした自由度を支えているのは、CG 技術や 3D モデリングツールの発展によって、専門家でなくともアバターを制作・カスタマイズできる環境が整備されたことにある。

一方、物理空間に目を向けると、ロボットを自己表現の媒体として活用する可能性が注目されつつある。遠隔操作ロボット「OriHime」を用いた分身ロボットカフェでは、外出が困難な人々がロボットを介して接客を行い、社会参加を実現している。また、教育やエンターテインメントの分野でも、ユーザが操作するロボットを通じた他者との交流が試みられている。ロボットは画面越しのアバターと異なり、物理的な存在感を伴うため、対面のコミュニケーションにおいて高い社会的プレゼンスを発揮しうる。

しかし、デジタル空間のアバターが持つ自由なカスタマイズ性は、物理的なロボットの領域ではほとんど実現されていない。現在のソーシャルロボットの大半はレディメイド(既製品)であり、ユーザ個人の好みや特性を外見や動作に反映する手段に乏しい。このギャップの背景には、主に二つの技術的障壁がある。第一に、ロボットの形態設計や動作制御には機械・電子・情報工学にまたがる専門知識が必要であり、一般のユーザが自らロボットを構築することが困難である。第二に、用途や表現したい姿に応じて求められる身体構造が大きく異なるため、多様な形態に対応する汎用的な構成方法の確立が難しい。

2. 目的

本プロジェクトでは、モジュール型ロボットをユーザが自由に組み立て、かつそのロボットを自らの身体動作で直感的に操作できるシステムの構築を目標とした。達成すべき目標は 3 つに集約される。第一に、すべてのモジュールが市販部品と 3D プリンタで製作可能であり、オープンソースとして公開できる設計であること。第二に、カメラによる身体動作の認識と関節対応の自動マッピングにより、ユーザがプログラミングなどの専門知識なしにロボットを身体で自由に操作できること。第三に、ロボットの組み立てから動作マッピングの設定、カメラを用いた操作までを一貫して行えるインターフェースを提供することである。これら 3 つの目標を通して、ユーザが物理的な「なりたい自分」をロボットという物理的な存在として表現し、それを自分の身体で操作することで行為主体感を獲得できるような体験の実現を目指した。

3. 開発の内容

本プロジェクトでは、モジュール型ロボット「Katakko」の開発プラットフォームを構築した。ユーザがブロック型のモジュールを自由に組み合わせてオリジナルロボットを構築し、それを自らの身体動作で操作するというコンセプトのもと、ハードウェア層・動作マッピング層・ソ

ソフトウェア層の三層で構成される。

3.1. ハードウェア

Katakko のハードウェアを図 1 に示す。図 1 左はモジュールを組み立てた例、図 1 右はモジュールの電飾部品の一例である。

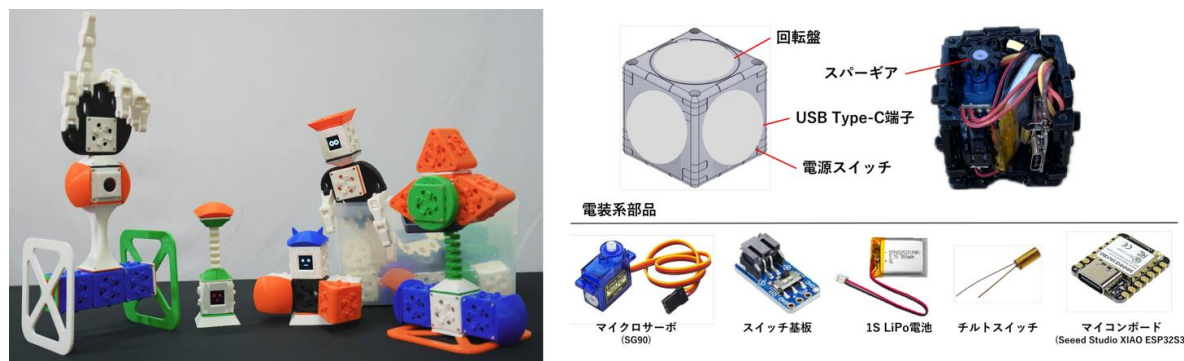


図 1: Katakko のハードウェア

モジュール間の接合には、「つけやすく、取れにくい」という要件を満たす独自のツメ型接続機構を開発した。3D プリンタでの造形を前提とし ABS 樹脂を採用している。各接続面に配置された 4 つのツメと 4 つの受け穴が、面を押し付けるだけで合計 8 箇所かみ合い結合する。押し付けるとツメがたわんで穴に入り込みロックされ、引き離す力に対してはガード構造により高い保持力を実現する一方、折るように力を加えることで意図的な取り外しに応じる設計である。

ロボットの関節として動作するアクチュエータモジュールは、マイコンボード (XIAO ESP32S3)、サーボモーター (SG90)、リチウムポリマー電池を内蔵し、単体で無線動作が可能である。表情表示を担うディスプレイモジュールは、M5AtomS3 と拡張バッテリーで構成される。いずれも専用基板を使用せず市販部品のみで構成した。多数モジュールの一斉起動のため、チルトスイッチによるウェイクアップ機構を導入し、ロボットを振るだけで全モジュールが起動する。さらにハンドモジュール、車輪モジュール、バネモジュールなどの拡張モジュールや、最大 15 個を収納・充電できるケース (Katakko House) も開発した。

3.2. 動作マッピング

任意の構造のロボットを身体で操作するため、ロボットと人間の身体構造をそれぞれ「関節をノードとするグラフ」として表現し、関節の親子構造の一致度と空間的順序の一致度を評価関数として、遺伝的アルゴリズムにより最適な関節対応を自動探索する手法を開発した。これを動作マッピングと呼ぶ (図 2)。本手法はランダム探索と比較して高速かつ高い収束性を確認している。図 2 左はマッピングの結果の例、図 2 右は親子関係・空間的順序の一致度が高い例と、低い例を示している。

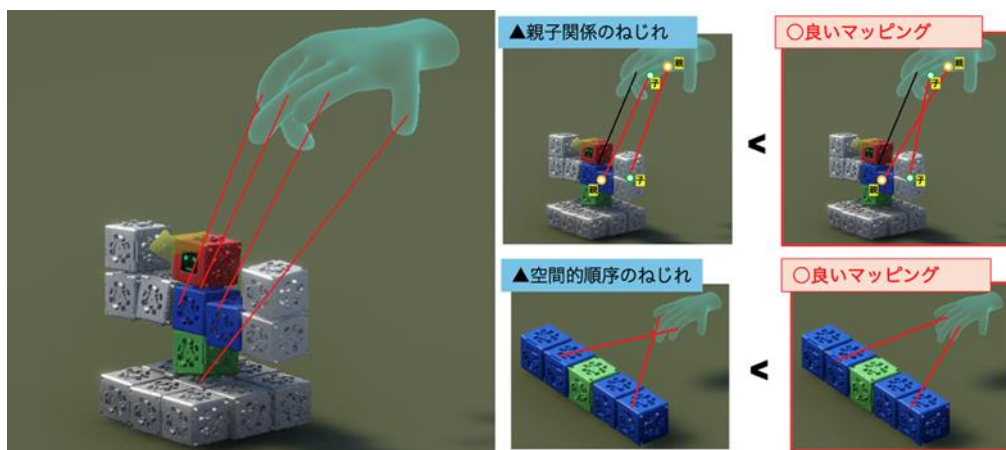


図 2: 動作マッピングの例

さらに、画像からロボット構造を推定するシステムも開発した。ユーザが複数枚の写真を撮影すると、セグメンテーションモデル (SAM3) による背景マスク、三次元再構成モデル (VGGT) による点群再構成、k-means クラスタリングと立方体パラメータ最適化を経て、モジュール接続関係が自動推定される。処理時間は概ね 1~3 分程度である。この構造認識により、組み立て・自動設定・操作・修正という試行錯誤のループが繋がり、直感的なロボット制作体験を可能にした。

3.3. ユーザインタフェース

Katakko を操作するためのユーザインタフェースを図 3 に示す。図 3 左は、Web から Katakko の操作・シミュレーションをするためのインタフェース、図 3 右は Unity を用いて実装した Katakko を使ったゲーム環境を示している。

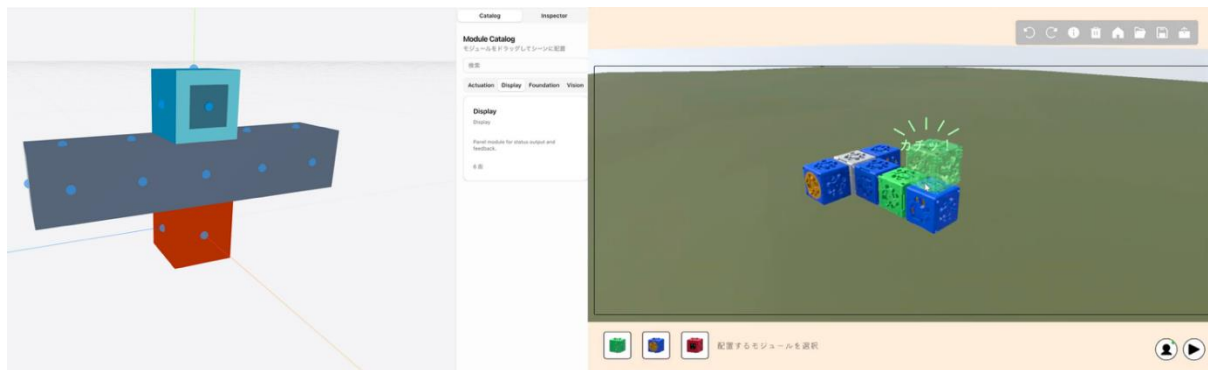


図 3: Katakko のユーザインタフェース

Web 操作インタフェースは Node.js ベースの Web アプリケーションとして実装した。ユーザはグリッドインタフェースでモジュール構成を入力し、自動マッピングを実行する。操作モードでは Web カメラ映像を MediaPipe でリアルタイムに解析し、身体ランドマークを検出する。検出情報はマッピングに基づいて各関節の目標角度に変換され、UDP で各アクチュエータに送信されることで実機を制御する。初期にはノードベースの手動マッピング UI を設計したが、ユーザテストで非人間型ロボットにおける設定の困難さやエディタの学習コストが課題となり、自動マッピング連携方式へ転換した。

展示向けには、ロボット組み立て記録用アプリと身体操作体験用アプリの 2 種を開発した。いずれも React 18 / Vite + Node.js(Express)構成で、展示環境の制約(来場者の入れ替わり, スタッフ介入の最小化, 子供対応)を考慮した。漢字へのふりがな付与, WebSocket による状態同期, UDP ブロードキャストによるロボット自動検出, Web Speech APIによる音声案内を実装し、限られたスタッフでの運用を実現した。

さらに、実機を持たないユーザ向けにUnityによるシミュレーション環境を開発した。3Dグリッド上でのロボット組み立て(ビルダー機能), MuJoCo 互換物理シミュレーションへのエクスポート, MoveNetによるWebカメラ操作を統合している。ステージクリア型のゲームモードでは、ロボット構造による移動能力の違いから構造自体を見直す試行錯誤が促される。WebGL ビルドによりブラウザ配布が可能で、実機制作への興味を喚起する導線として機能する。

4. 従来の技術(または機能)との相違

OriHime は遠隔コミュニケーション支援を目的とする分身ロボットであるが、全員が同一デザインのロボットを使用するためユーザの個性を反映できない。本プロジェクトでは、ユーザ自身がロボットの形態を自由に設計できる点で差別化している。ClicBot や Cubelet はモジュラーロボットとして多様な形態を構成できるが、コンパニオンロボットや教育用途が前提であり、ユーザの身体動作によるリアルタイム操作は想定されていない。動作設定にはマニュアル入力が必要で直感的とは言い難い。

本プロジェクトでは、市販部品と 3D プリンタで製作可能なオープンソースハードウェア、画像による構造認識と遺伝的アルゴリズムに基づく自動動作マッピング、Web・Unity の統合操作環境を一体として構築した点が独自の特徴である。

5. 期待される効果

本プロジェクトの成果として、再現性の高いオープンソースハードウェアにより、研究機関だけでなく個人開発者や教育現場でも導入・改良しやすい構成が実現された。構造認識・操作設定・操作UIの統合により、面倒なデータ入力やプログラミングを必要とせず、直感的な組み立て・設定・操作の反復による試行錯誤を促すことができる。Maker Faire Tokyo および The Lab.での展示を通じて継続的にユーザフィードバックを収集し、実利用環境での有効性確認と改善サイクルを確立した(図 4)。また、Web ゲームにより実機未所有のユーザにも価値を伝えられ、SNS 等での発信と組み合わせた新しいロボットシステムの紹介方法を提示した。



図 4: Katakko の展示の様子

(左)Maker Faire Tokyo2025 の展示, (右)The Lab.における常設展示

6. 普及(または活用)の見通し

モジュール接続機構については特許出願を進めており, 出願完了後に GitHub にてオープンソース公開を行う。ライセンスには Apache License 2.0 などの特許許諾条項を利用し, コミュニティユーザには利用可能としつつ他者からの防衛手段とする。公開後は Discord を中心とした開発者コミュニティを構築し, 新規モジュールや動作変換手法, ロボット作例, 運用ノウハウを共有できる環境を整備する。

展示実績として, Maker Faire Tokyo 2025 ではオープンソース設計の思想が評価され SLB 賞を受賞した。The Lab.(グランフロント大阪ナレッジキャピタル内)では常設展示を実施し, 400 名超の来場者がロボット制作・操作を体験した。今後は, ワークショップの開催により社会実装・教育活用の知見を蓄積するとともに, 国際学会等での発表により海外への情報発信を進める。

7. クリエータ名(所属)

横井 総太郎(東京大学 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻)

四反田 直樹(東京大学 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻)

松尾 健登(東京大学 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻)

(参考)関連 URL

GitHub: <https://github.com/katakko-robots>

Maker Faire Tokyo 2025 受賞紹介記事:

<https://makezine.jp/blog/2025/12/mft2025-young-maker-challenge-2025.html>