

# PreMaCube：感圧導電シートを2次元マーカとして用いるキューブ型インタフェースの開発

株本 くるみ<sup>1</sup> 清水 怜良<sup>1</sup> 上村 宙<sup>1</sup> 由谷 哲夫<sup>2</sup> 渋谷 敦子<sup>2</sup> 湯村 翼<sup>1,a)</sup>

**概要：**センシングにおいて異なるモダリティの情報取得には、異種のセンサやデバイスを併用するのが一般的である。我々は、この前提を再検討し、単一の素材が複数のセンシング方式に対応する”One Device, Multi Sensing”というコンセプトのインタフェース設計を試みる。本研究では、その一事例として、把持検出と位置揭示を行うキューブ型インタフェース PreMaCube を開発する。PreMaCube では、感圧導電シート Velostat をマーカ状に加工してキューブ表面に貼り、把持や接地を検知する圧力センサと2次元マーカの両方の役割を担う。PreMaCube の実装にあたり、マーカの加工材料として修正液、水性顔料ペン、ビニールテープの3種類で試作して比較し、ビニールテープを採用した。PreMaCube のユースケースとして、2次元マーカを認識して画面内にアバターが表示される AR アプリケーション PreMaAR を実装した。これらのプロトタイプ実装により、One Device, Multi Sensing のコンセプトを実証した。

## 1. はじめに

人とコンピュータとのインタラクションにおいて、マルチモーダル (multi-modal) は、視覚、聴覚、触覚等の複数の感覚チャネルを用いた情報提示および入力を指す概念として広く用いられてきた。複数のモダリティを組み合わせることにより、人に対して豊かで臨場感のある体験を提供する。例えば、4DX デジタルシアター [1] など、エンタテインメント分野において特によく応用されている。一方、センシングにおいては、異なるモダリティの情報を取得するためには異なる種類のセンサやデバイスを併用する必要がある。圧力の検知には感圧センサ、動きの取得には加速度センサが用いられており、センシング対象ごとに適したデバイスを使用することが一般的である。取得したいモダリティごとにセンシング機能を追加することが、インタフェース設計における前提とされる。

我々は、この前提を再検討し、単一の素材が複数のセンシング方式に対応するという方針でインタフェースの設計を試みる。このコンセプトを”One Device, Multi Sensing”と名付ける。本研究では、その一事例として、把持検出と位置揭示を行うキューブ型インタフェース PreMaCube を開発する。把持検出と位置揭示は、いずれもキューブ表面の感圧導電シートが担う。把持は、キューブ把持時の圧力

変化を感圧導電シートによって検知する。感圧導電シートが黒色である特徴を活用し、感圧導電シートをマーカ状に加工してキューブ表面に貼ることで、2次元マーカとしての役割も担う。これにより、感圧導電シートは、圧力検知とカメラによる画像認識という、異なるセンシング方式に対応することが可能となる。また、ユースケース例として、2次元マーカを認識して画面内にアバターが表示される AR アプリケーション PreMaAR を実装した。ユーザがキューブの把持や机上への設置といった操作を行うと、その圧力変化を読み取り、アバターのモーションを変更する。

我々は、過去の研究において、靴の形状認識 [2] や人物識別 [3] を目的として感圧導電シートを用いた圧力センサを開発した。これまで2次元で展開していた圧力センサを、本研究では3次元へ拡張する。

## 2. 関連研究

### 2.1 キューブ型インタフェース

キューブと2次元マーカを組み合わせたインタラクション研究は、ゲームやなどの多様な分野での応用が展開される。

Magic Story Cube[4] は、折り畳み可能な立方体に AR マーカーを配置し、物理的な展開操作に応じて物語が進行するインタラクティブなナラティブ体験を提案した。AR ボードゲーム Jumanji Singapore[5] では、キューブを振る・動かすといった物理的操作で仮想キャラクターの移動や選択を行う遊びを実現した。HMD と AR マーカーを併

<sup>1</sup> 北海道情報大学

<sup>2</sup> First Four Notes 合同会社

<sup>a)</sup> yumu@yumulab.org

用し、物理玩具をデジタル体験へと拡張する先駆的な取り組みであった。Augmented Rubik's Cube[6]は、ルービックキューブにAR マーカー付きステッカーを貼付して、面の回転や傾き操作をゲーム入力に対応させる。Lee ら [7]は2つのマーカー付きキューブを両手で操作するキュービカルユーザーインターフェースを提案し、仮想オブジェクトの結合・配置など3Dモデリングに応用可能な直感的操作手法を提示した。CogARC[8]は、認知訓練を目的とし、ARマーカー付きの複数のキューブを用いてミニゲームを実施することで、視覚認識と物理操作を組み合わせたインターフェースを構築している。

教育に関する応用では、谷村と曾我 [9]がスペイン語単語学習の支援を目的としたARキューブシステムを開発し、キューブを回転させることで動物CGと単語の対応を学ぶインタラクションを実現している。中野ら [10]は学習支援の観点から、マーカー付きキューブをスマートフォンと組み合わせ、空間図形の回転認識を支援するAR教材を構築した。

以上のように、キューブと2次元マーカを組み合わせたインターフェース式は様々な領域で応用されてきた。本研究では、これらの知見を踏まえ、2次元マーカに加えて圧力センサを組み込むことで、把持と接地という入力を受け付ける新たなインタラクションを提示する。

## 2.2 One Device, Multi Sensing

本研究では、インターフェース設計において、単一デバイスが複数のセンシング機能を担う "One Device, Multi Sensing" というコンセプトを掲げる。BumpMarker[11]は、突起付きの3Dプリント製マーカーと高解像度圧力センサシートを組み合わせることで、物体のID認識・位置追跡・重量推定を同時に実現する手法である。底面のピン配列によりマーカーIDを符号化し、シート上での接触圧分布から識別と計測を行う。本研究とは異なり、マーカー自体にセンシング機能はなく、外部の大型センサシートを前提とする点に違いがある。

PrintSense[12]は、柔軟基板上に印刷された単層の導電性電極パターンを用いて、タッチ・近接・圧力・曲げといった複数の入力を同時に検出可能なマルチモーダルセンシング手法である。信号の時間多重化により、1つの電極構造で多様なセンシングを実現している。低コストかつ曲面や変形面にも対応可能で、プロトタイプ用途に適している点が特徴である。

本研究では、導電性フィルムであるVelostatを単一素材として採用し、圧力変化の検出とARマーカーとしての視覚的識別という、異なるモダリティのセンシング機能を同時に担わせている。これは、センシング手段の物理的な重畳を避けつつ、1つの素材に役割の多重性を持たせるという点で、上記研究と共通する設計理念を有する。特に本研究

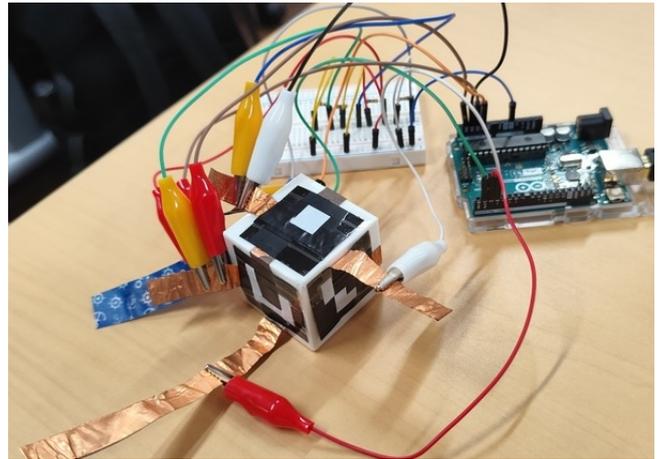


図1 キューブ型インターフェース PreMaCube.

では、ARマーカーがカメラで非認識状態にある場面においても、圧力入力が代替的に機能するというインタラクションの継続性が新規性として挙げられる。

## 3. PreMaCube

### 3.1 概要

本研究では、立方体の表面に、圧力センサと2次元マーカーを取り付けたPreMaCubeを開発した(図1)。キューブ本体は一辺40mmの立方体を3Dプリンタで出力し、2次元マーカーとして加工したVelostatを貼付した。

### 3.2 マーカーの制作

黒色のVelostat上に白色の2次元マーカーパターンを形成するため、修正液、水性顔料ペン、絶縁テープでの描画を試みた。マーカーのパターンは、OpenCVに付属する4×4のArUcoマーカーとした。ArUcoマーカーは、黒い正方形の枠内に白黒のエブロックが格子状に並んだ形状であり、内部のエブロック配置パターンによって個々のIDを識別する。

### 修正液

修正液は、有機溶剤を溶媒として分散した顔料および樹脂成分から構成され、塗布後に溶剤が揮発することで厚く不透明な被膜を形成する。本研究では、ぺんてる社のペン修正液WHITESPEEDを用いてマーカーパターンを形成した(図2(a))。読み取りを行った結果、2次元マーカーとして認識することができた。また、マーカーパターンを形成したVelostatを用いて圧力計測を行った結果、干渉等の問題はなかった。しかし、時間経過によってVelostatおよび銅箔テープから剥離し、亀裂が生じるという問題が明らかとなった。これより、修正液での描画は実用に向かないと判断した。

### 水性顔料ペン

水性顔料ペンは、水を溶媒として分散した顔料および樹脂

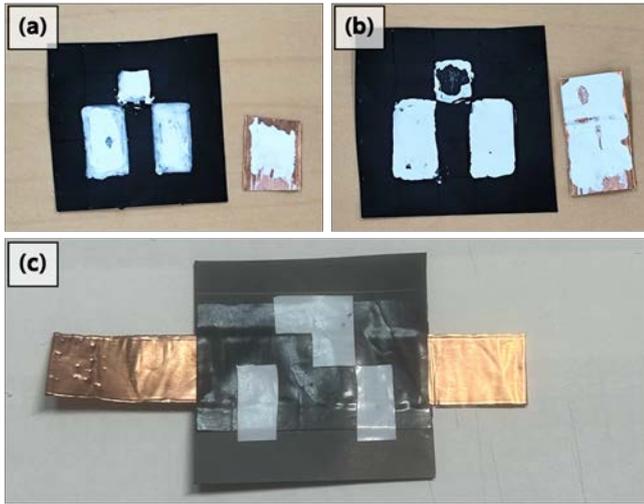


図 2 試作した 2 次元マーカ。(a) 修正液。(b) 水性顔料ペン。(c) ビニールテープ。

脂成分から構成され、塗布後に乾燥することで薄く均一で耐水性を有する被膜を形成する。本研究では、三菱鉛筆社の POSCA 白を用いてマーカパターンを形成した (図 2(b))。読み取りを行った結果、2 次元マーカとして認識することができた。また、マーカパターンを形成した Velostat を用いて圧力計測を行った結果、干渉等の問題はなかった。しかし、銅箔テープにしっかり塗布することが難しく、マーカとして認識されるパターンを描画することが困難であった。これより、水性顔料ペンでの描画は実用に向かないと判断した。

### ビニールテープ

ビニールテープは、ポリ塩化ビニル (polyvinyl chloride: PVC) を基材としたテープである。本研究では、白色のビニールテープを用いてマーカパターンを形成した (図 2(c))。読み取りを行った結果、2 次元マーカとして認識することができた。また、マーカパターンを形成した Velostat を用いて圧力計測を行った結果、干渉等の問題はなかった。以上より、本研究ではビニールテープを用いてマーカパターンを形成する。

### 3.3 圧力センサ

感圧導電シート Velostat を用いて、圧力のセンシング機能を実装した。圧力のセンシングは、キューブの把持検知および接地検知に用いられる。圧力センサは、感圧導電シート Velostat、銅箔テープ、マイコンで構成される。

Velostat は、圧力がかかると電気抵抗が低下する特性を持つ。Velostat の両面を銅箔テープで挟み込むと、圧力がかかった際のみ通電して電気回路を形成する。この仕組みによって、圧力センシング機能を実装する。銅箔テープには幅 10 mm のものを用いた。

圧力の強さに相当する電圧の値は、マイコンによって読

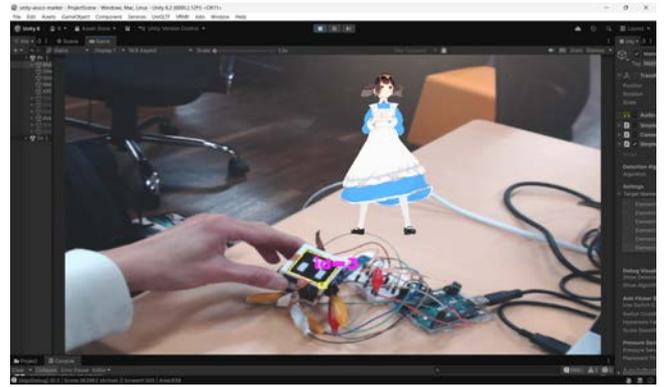


図 3 PreMaAR

み取りを行うマイコンには、Arduino Uno R3 を用いた。マイコンは、読み取った値を USB シリアル経由で PC に送信する。

## 4. PreMaAR

### 4.1 概要

PreMaCube のユースケースとして、アバターを表示する AR アプリケーション PreMaAR を実装した (図 3)。PreMaAR は、PreMaCube の 2 次元マーカの位置にキャラクターのアバターを表示する。PreMaCube が把持や接地を検出すると、アバターのモーションを変える。PreMaAR の実装には Unity を用いた。アバターにピクシブ社の VRoid Hub で配布される AvatarSample A[13] を、モーションには Universal Animation Library[14] を用いた。

PreMaCube の 6 つの面には、異なる ID を持つ  $6 \times 6$  の ArUco マーカを配置した。PreMaAR は、Web カメラを通じて ArUco マーカを認識する。マーカの 3 次元位置と姿勢を推定し、カメラ映像内にマーカの ID に対応づけたアバターを表示する。また、PreMaCube と PC を USB シリアル通信で接続し、各面の圧力センサ値を取得する。この値に基づき、PreMaCube の把持および接地を判定する。把持および接地をしていない通常時、アバターは会話モーションを再生する。把持時はダンスモーション、接地時は着座モーションを再生する。

### 4.2 対象マーカの判定アルゴリズム

PreMaAR では、アバターを 1 つのみ表示する。しかし、マーカが PreMaCube の全面に貼り付けられているため、複数のマーカを同時に認識してしまうという課題があった。キューブの天面に位置するマーカのみを認識するため、天面のマーカを特定するアルゴリズムを検討した。以下の 5 種類の特定アルゴリズム候補を考案した。

- 2D 画像上の面積を比較する
- 3D 計算を行いカメラとの正対度を比較する
- 3D 計算を行い物理的な高さを比較する
- 動的に現在の天面を上と学習する

e) 2D 画像上の Y 座標を比較する

これらを実装して検証し、以下のとおりの結果となった。

- a) 遠近法により側面が大きく映る場合があるため不採用
- b) 見下ろし視点で側面が優先されやすいため不採用
- c) 単眼カメラの深度推定誤差により値が安定しないため不採用
- d) 一度誤認識すると誤った状態が継続するため不採用
- e) 天面のマーカ特定に利用できる

検証の結果, e) のアルゴリズムを採用した。この手法は, ユーザが見ようとする天面が画面の下側に隠れることはないという性質を利用したものである。さらに, マーカの面積もスコアに加算し, 数値のブレに対する堅牢性を高めた。このアプローチにより, 安定した天面判定を実現した。

### 4.3 アバター表示の安定化処理

アバターの安定した表示のため, 以下の安定化処理を実施した。

- センサの値の変動の影響を抑制するため, 線形補間によるスムージング処理を導入
- 天面マーカ判定の頻繁な入れ替わりを防ぐため, 選択中のマーカのスコアを 1.2 倍にするヒステリシス制御を導入
- 急激な回転操作時の誤判定を防ぐため, アバター切り替え直後の 0.3 秒間は判定をロックするクールダウン機能を導入

## 5. おわりに

本研究では, 圧力検知と 2 次元マーカの機能を 1 つの素材に統合したキューブ型インタフェース PreMaCube を開発し, 単一素材によるマルチセンシングの可能性を示した。今後, 配線の整理を含めた筐体設計の更新, 合成抵抗を用いた把持の検知手法の開発, 複数のキューブを連携する手法の開発などを行っていききたい。加えて, キューブ型インタフェースを活用したユースケースの模索も行う。

## 参考文献

- [1] ユナイテッド・シネマ: 4DX デジタルシアター, <https://www.unitedcinemas.jp/4dx/>.
- [2] Kamimura, S., Yutani, T., Shibuya, A. and Yumura, T.: Shoe Recognition Model with Floor Pressure Sensors, *The Eighteenth International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 10–11 (2024).
- [3] 上村 宙, 由谷哲夫, 渋谷敦子, 湯村 翼: 感圧導電シートを用いた床面圧力センサによる人物同定手法の開発, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2025-HCI-213, No. 31, pp. 1–6 (2025).
- [4] Zhou, Z., Cheok, A. D., Pan, J. and Li, Y.: Magic Story Cube: an interactive tangible interface for storytelling, *Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 364–365 (2004).
- [5] Zhou, Z., Cheok, A. D., Chan, T. and Li, Y.: Jumanji

Singapore: an interactive 3D board game turning Hollywood fantasy into reality, *Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 362–363 (2004).

- [6] Bergig, O., Soreq, E., Hagbi, N., Pevzner, K., Levi, N., Blau, S., Smelansky, Y. and El-Sana, J.: Out of the Cube: Augmented Rubik' s Cube, *International Journal of Computer Games Technology*, Vol. 2011, No. 1, p. 570210 (2011).
- [7] Lee, H., Billingham, M. and Woo, W.: Two-handed tangible interaction techniques for composing augmented blocks, *Virtual Reality*, Vol. 15, No. 2, pp. 133–146 (2011).
- [8] Boletsis, C. and McCallum, S.: Augmented reality cube game for cognitive training: an interaction study, *pHealth 2014*, IOS Press, pp. 81–87 (2014).
- [9] 谷村里穂, 曾我真人: AR キューブを用いたビジュアルに楽しみながら学習できる単語学習支援システム, 第 45 回教育システム情報学会全国大会, pp. 147–148 (2020).
- [10] 中野美登里, 松原行宏, 岡本 勝, 岩根典之: メンタルローテーション課題のための AR 型学習支援システム, 日本感性工学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 201–208 (オンライン), DOI: 10.5057/jjske.TJSKE-D-18-00077 (2019).
- [11] Han, C. and Naemura, T.: BumpMarker: a 3D-printed tangible marker for simultaneous tagging, tracking, and weight measurement, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 7, No. 1, pp. 11–19 (2019).
- [12] Gong, N.-W., Steimle, J., Olberding, S., Hodges, S., Gillian, N. E., Kawahara, Y. and Paradiso, J. A.: PrintSense: a versatile sensing technique to support multimodal flexible surface interaction, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1407–1410 (2014).
- [13] VRoid Project: AvatarSample\_A, <https://hub.vroid.com/characters/2843975675147313744/models/5644550979324015604>.
- [14] quaternius: Universal Animation Library, <https://quaternius.com/packs/universalanimationlibrary.html>.