

# MarbLED: 人工大理石透過型LEDタッチディスプレイとそのアプリケーションプラットフォーム

浦 千尋<sup>1,a)</sup> 中植 義斗<sup>1,b)</sup> 蚊野 浩<sup>2,c)</sup> 平井 重行<sup>2,d)</sup>

**概要:** 光を透過・拡散する人工大理石の特性を活用し、その素材が使われているキッチンの天板や洗面台等をコンピューティングプラットフォームへと変えるシステム "MarbLED" を提案する。MarbLED のハードウェアは、小型の LED マトリクス基板の形をしており、RGB フルカラー LED によるディスプレイ機能と、IRLED による赤外光を利用したタッチや物体検出が可能なセンシング機能とを統合化した基板となっている。また、MarbLED のソフトウェアは、小型基板を複数枚並べて一つのディスプレイとして連携させ、アプリケーションプラットフォームとして機能させることができる。我々は、これらハードウェアおよびソフトウェアプラットフォームと共に、アプリケーション開発が容易となる SDK も開発した。本稿では、MarbLED のハードウェアの機能と性能について、またソフトウェアの構成と機能について述べ、MarbLED を活用したアプリケーション例について示す。

## 1. はじめに

スマートホームに向けたユーザーインターフェイスやインタラクション技術に関する研究において、キッチンや洗面台に注目した研究が進められている。[1], [2], [3] ここでは、情報の提示をプロジェクションによって行う研究が多数を占めている。一方で、生活空間に馴染んだインターフェイスを実現することを目的に、ディスプレイやコントローラの機能を表面から見えないように隠したインターフェイスも提案されている。[4], [5], [6] その中で、Tada らは既存のキッチン天板の背面に、センサを備えた LED マトリクスディスプレイを埋め込むことによるタッチディスプレイの実装を提案した。[5] このシステムは高解像度の表示には適していないが、薄いデバイスで実現することができ既存の住宅設備に後付けできることが利点である。これに続く我々の研究 [7] では、前述のタッチディスプレイのハードウェアを表面実装基板として開発し、タッチ及び領域検出の機能を実現することで実用的なデバイスへ近づけた。本研究では、これらデバイスに存在したいくつかの問題点を改善するとともに、より高輝度での表示と大面積でのセンシングを実現するために、新たな基板の設計と実装

を行った。加えて、デバイスの設定や動作環境を抽象化したソフトウェア開発キット (SDK) の開発も行った。この SDK は開発者に対して、LED タッチディスプレイの機能を提供する。これらハードウェアとソフトウェア環境を総称して「MarbLED」と呼び、本稿では MarbLED のハードウェアの概要とソフトウェアプラットフォームの機能について説明する。加えて、SDK を使用して開発されたスマートキッチンを実現するアプリケーションの例をいくつか示す。

## 2. システムの概要

本研究は、キッチンや洗面台の天板に使用される樹脂製の人工大理石に着目したものである。既設の住宅設備に存在する僅かな隙間に取り付けることを目標にするため、狭いスペースに収まるデバイスにする必要がある。そこで、LED マトリクスディスプレイのような薄型のデバイスを使用する。加えて、パネル内の RGBLED の一部を IRLED とフォトディテクタに置き換えることで、キッチンや洗面台の天板でタッチや物体の検出を実現する。人工大理石は、光を透過および拡散する性質を持っており、人工大理石に入った光はその厚みに応じて拡散する。その結果、RGBLED の光は拡散しながら透過し、天板表面にはぼやけた図形が表示される。この特性により、RGBLED の一部を可視光を発しない IRLED やフォトディテクタに置き換えたとしても、その欠けた画素を隠蔽することが可能である。センシング基板上に構成するタッチインターフェー

<sup>1</sup> 京都産業大学大学院

<sup>2</sup> 京都産業大学

a) ura@3ccd.jp

b) ynkue165@gmail.com

c) kano@cc.kyoto-su.ac.jp

d) hirai@cc.kyoto-su.ac.jp

スは図1のような仕組みで動作する．赤外線 LED の赤外光が人工大理石を透過し，人工大理石上のタッチや物体で反射し再度大理石を通過してフォトディテクタに入力される．この入力**の強弱**によって物体の検出を行う．このIRLEDとフォトディテクタをLEDマトリクス内で離散的な市松格子状に交互に配置することで，赤外反射光の2次元的な検出を行う．さらに，その離散的なフォトディテクタの検出光量に対し，線形補間によってセンサ間の値を補間することにより，2次元でのタッチ位置や物体領域の検出を高解像度化する．

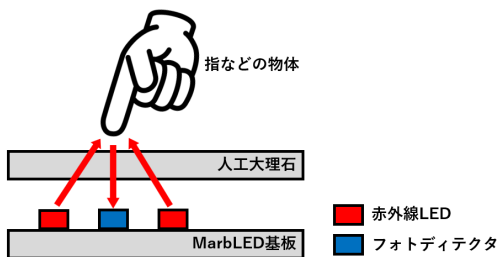


図1 赤外線タッチパネル動作のイメージ

### 3. ハードウェアの試作

#### 3.1 構成

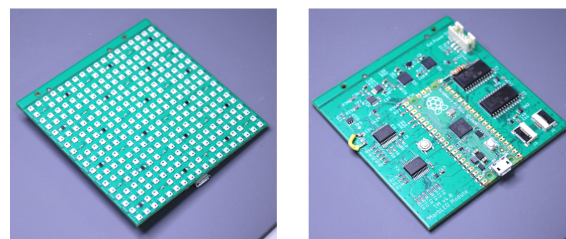
MarbLEDのハードウェアは人工大理石の背面に配置する．我々の以前の試作 [7] では，描画機能を市販のLEDマトリクスディスプレイで行い，その上にセンシング用の基板を重ねることで画面表示とタッチセンシングの双方を実現していた．ただ，それには実用・実践上の観点で次の2点の問題があり，本研究ではそれらの改善と機能追加を行った．

- (1) 人工大理石を透過させて観察するLEDの輝度が不十分で，明るい場所での視認性が低い．
- (2) 拡張性のないセンシング基板のため面積に限度がある．

(1)の問題に対し，ここでは高輝度RGBLEDを用いることとした．そして，表示機能とセンシング機能とを統合した表面実装基板を設計し，試作した．その基板の両面の様子を図2に，またLED・センサ面を拡大した素子の様子を図3に示す．(2)の問題に対しては，基板を複数枚並べて配置し利用面積を拡張できるように基板を設計した．現状の試作基板を複数接続する場合の接続構成を図4に示す．ここでは，いくつかの基板をデジチェーンで繋いで制御するサブコントローラ (RP2040 マイコン) があり，複数のサブコントローラをネットワークを通じて束ね，すべての基板を制御する構成としている．これにより複数枚の基板を並べて連携させ，面積に拡張性を持たせる．

#### 3.2 多層基板の回路設計と実装

MarbLEDの基板は，先行研究 [7] でのセンシング基板



(a) LED・センサ面 (b) 裏面

図2 試作した基板

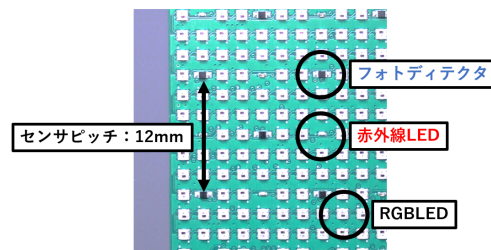


図3 基板上での素子の配置

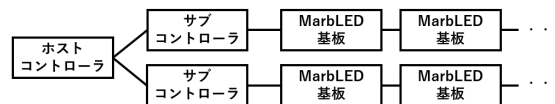


図4 MarbLEDシステムの構成と接続

の設計を踏まえ，LEDマトリクス形態のプリント基板として新たに多層基板を設計した．素子の高密度化を行い，薄型デバイスとして構成するため，表面実装部品を用いている．現時点の試作基板は4層基板であり，表面に高輝度RGBLEDとIRLED，フォトディテクタをアレイ状に配置し，LEDマトリクス面を構成した．裏面には，LEDドライバやマルチプレクサ，ADCなどのICと，その他表面実装部品を配置した (図2参照)．中間層の2層はそれぞれRGBLEDの配線，センシング機能の配線を行っている．なお，この試作では裏面にRaspberry Pi Pico (RP2040 マイコン) を配置し，各基板の制御とデータ通信を担っている．その基板内でのICの構成や接続を図5に示す．

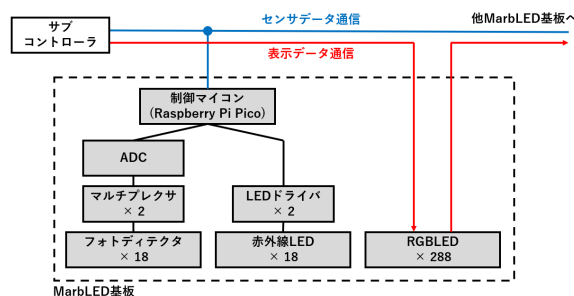


図5 MarbLED 基板の構成と接続

### 4. センシング機能の評価

本節では，試作したハードウェアの動作確認と評価を

行う。

#### 4.1 ディスプレイ表示

LEDマトリクスディスプレイの表示輝度について確認した。以前の試作 [7] では、センシング基板の下側に配置したLEDマトリクスの光がスルーホールを通じて人工大理石へ入光していたため、輝度が多少低くなっていた。今回のMarbLED基板では高輝度RGBLEDを採用し、LEDマトリクスとして人工大理石の直下で光らせることで、ディスプレイとしての表示輝度の向上を図った。結果を図6に示す。どちらのタッチパネルディスプレイも厚み6mmの人工大理石下に設置し、同一の環境とカメラの露出で撮影した。

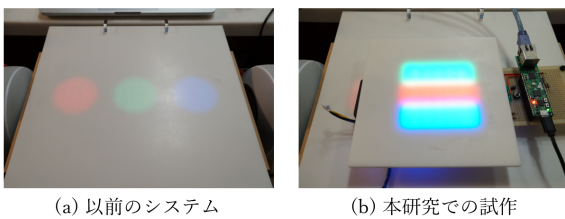


図6 人工大理石を介して表示させた様子

図6(a)はRGB各色で円を描画させ、図6(b)はRGB各色で縞模様を描画したものである。以前の表示に比べ、MarbLEDの試作基板の輝度が向上していることが確認できる。

#### 4.2 検出可能な物体サイズ

MarbLEDシステムはキッチンなどで、タッチパネルディスプレイとして使用することを前提としている。そこで、離散的なフォトディテクタの配置で、指先位置の連続的な検出が可能であることを示す評価実験を行った。ここでは厚み6mmの人工大理石の下にMarbLED基板を配置し、指先のタッチサイズを想定した円形のMDF板を用意して人工大理石の表面に配置した(図7参照)。このMDF板は直径7.5mmから、25.0mmまでの範囲の6種類の直径のものを用いた。評価は、MDF板をセンサ(フォトディテクタ)の直上に配置した場合と、センサとセンサの間に配置した場合とでセンサ値を計測し、それらの位置の違いによる計測値の違いを比較する。これは物体サイズがセンサピッチより小さい場合に、人工大理石による光の拡散によって反射光の検出が可能であるか確認するためである。各条件でセンサ値を100サンプル取得し、その平均を図8に示す。

ここで、センサ値は大きいほど反射光が強いことを示しており、エラーバーは各物体サイズにおけるセンサ値の標準偏差を示している。物体サイズが大きくなるにつれて反射光が強くなっていることがわかる。また、センサ間に物



図7 円形の物体を人工大理石上に配置した様子

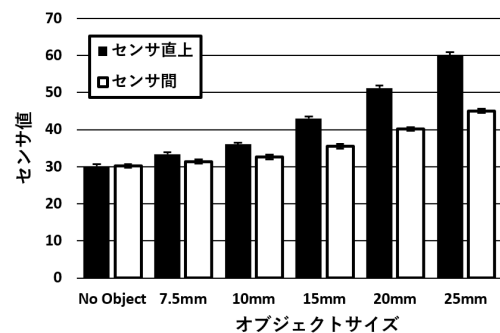


図8 物体サイズと、物体位置によるセンサ値の変化

体が存在する場合は直上に配置した場合に比べて反射光が弱くなっている。直上に配置した場合は、直径7.5mmの物体であっても物体なしと比較してセンサ値の差がセンサ値のばらつきに影響されない程度確保されている。しかしながら、センサ間に配置した場合直径7.5mmの物体は物体なしと比較して値の差が小さく、センサ値のばらつきによって検出が不安定になると考えられる。直径10mmでは、値の差はばらつきと比較して十分大きく、単純な閾値処理による物体の有無の区別が可能と言える。これらから、タッチしたときの接触面の直径が10mm程度以上であれば安定したタッチ検出が可能で、位置の変化を連続的に捉えることができると考えられる。

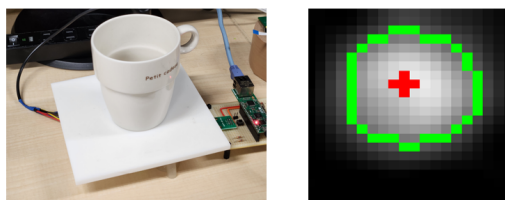
#### 4.3 タッチ位置と物体の検出

基板上で市松に配置されたセンサの出力値を画像化し、それを画像処理することで物体の検出を行う。具体的な検出の手順を下に示す。

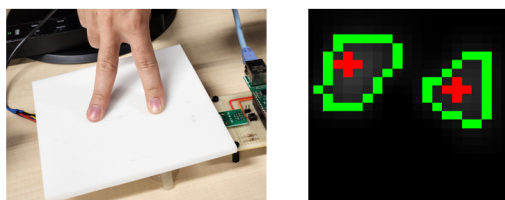
- (1) 前述の画像を線形補間で拡大し、センサ間の値を補間
- (2) 二値化した後、ラベリング処理を実行
- (3) 個々の領域の重心位置をタッチ位置として使用。

ここでは複数の条件下で上記の手順を実行し、センサと位置検出の動作を確認する。人工大理石に配置した物体と、その検出結果を図9に示す。MarbLED基板は6mm厚の人工大理石の中央下に配置した。

各図の右は、検出結果を示した画像である。緑色はラベリング結果の輪郭を表しており、赤色はその重心位置であ



(a) マグカップを置いた様子



(b) 二本の指で触れた様子

図 9 物体検出の動作確認

る。(a)(b) どちらの場合も、物体に対応した領域の反射光が強くなっており、領域の重心を求めることで位置を検出できている。しかしながら (b) の場合、輪郭線が歪んでおり、指先のように小さい物体の場合、形状の検出は不安定になる。

## 5. ソフトウェア環境

このディスプレイデバイスのためのアプリケーションをより簡単かつ効率的に開発するために、ミドルウェアとシミュレータを含むソフトウェア開発キット (SDK) を開発した。

ミドルウェアには、ソフトウェアライブラリとそのアプリ実行環境を含めている。ソフトウェアライブラリには、画像の表示や簡易なグラフィクス・アニメーションの描画の他、タッチイベントや物体領域に対する処理などの機能が含まれている。ランタイム環境の機能は、ハードウェアの抽象化、アプリケーションの切り替え、実装したアプリケーションのイベント処理の呼び出しなどである。これらの機能を利用することで、複数アプリの切り替えながらの操作を可能としている。

また、人工大理石を介して見た際のぼかしの入った表示をアプリ開発用 PC 上で再現するシミュレータを開発した。

### 5.1 ミドルウェア

#### 5.1.1 アプリケーションライブラリ

開発している SDK では、グラフィクス描画やイベント処理の実装に使用される Processing や openFrameworks のような、図形やテキスト、画像などの表示、タッチイベント処理などの API を含めたアプリケーションライブラリを提供している。また、天板の背面に配置するディスプレイデバイスは、複数枚パネルを縦横に並べて配置するため、描画処理を呼び出す場合は、実際の複数枚パネルを組み合わせた新しいワールド座標系で定義された座標を用いて描

画を行える。

#### 5.1.2 グラフィクス描画機能

上記のライブラリを利用することで、アプリケーションは天板表面に図形を表示することができる。具体的には、図 10 のように、ドット、直線、円、矩形などの図形を LED マトリクス上に表示する。また、ライブラリには動画や画像、テキストを表示する機能も用意しており、ユーザインタフェース (UI) デザインとして様々なコンテンツを制作することができる。ただし、ディスプレイの特性上、使用するフォントの種類やサイズには注意する必要がある、文字がぼやけて見えたり、滲んで見えることがある。

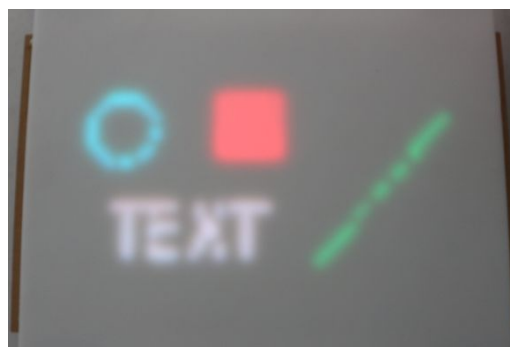


図 10 グラフィクス描画機能の例

これらの機能を利用することで、アプリケーション開発者は直感的に UI デザインを作成することができ、後述するタッチイベント処理と組み合わせることで、ボタンやスライダなどのインタラクティブな UI コンポーネントを作成することができる。

#### 5.1.3 マルチタッチイベント処理

Processing や openFrameworks のようないくつかのツールでは、PC 環境上でマウスクリック、キーボード入力、ディスプレイタッチ入力などに対するイベント処理を実装することができる。それらと同様に、本研究では、天板表面でのタッチイベントを検出してアプリケーションに通知するタッチイベント処理を実装した。複数点のタッチイベントや領域の管理には TUIO プロトコル [8] を使用している。

TUIO プロトコルは、Open Sound Control (OSC) プロトコル上に実装された複数のタッチ点情報を扱う通信プロトコルである。ディスプレイデバイス上の各センサからのデータを元に画像処理を行い、センシングプログラムから得られたタッチ点・領域情報を TUIO のタッチ点データメッセージとして送信する。そして、ランタイム環境においてタッチ点データを TUIO のタッチ点データを受信し、実行中のアプリケーションのタッチ点・領域イベントとして処理する。この機能により、天板表面でのタッチ入力を行うアプリケーションの実装が容易になり、インタラクティブなコンテンツの制作が可能となる。



### 5.1.4 ランタイム環境

スマートフォンやPCのユーザは、使いたいアプリケーションをインストールして切り替えながら使うことができる。本研究でもこれらと同様に、制作された複数のアプリケーションを読み込み、切り替えながら動作させるための実行環境も開発した。この機能により、ユーザは複数のアプリケーションを MarbLED システムにインストールしておき、ランチャーからアプリケーションを起動し切り替えることができる。

ランタイム機能としては、複数のアプリケーションデータを読み込み、切り替える機能と、描画した内容を天板背面に配置した LED マトリクスパネルに反映させる機能を実装した。様々な仕様の LED マトリクスパネルや、別のマイコンでの点灯制御など、今後のハードウェア構成の変更にも柔軟に対応できるように、アプリケーションの動作を管理する部分と、LED マトリクスの点灯制御をする部分を分離した設計としている。

また点灯制御については、基板を縦横に並べて配置するため、アプリの動作により更新されたスクリーン全体の点灯状態から、図 11 のように各サブコントローラに必要な部分のみを切り出して点灯状態を示す RGB データを送信することで、それぞれのサブコントローラで RGBLED の点灯制御を行えるようにしている。

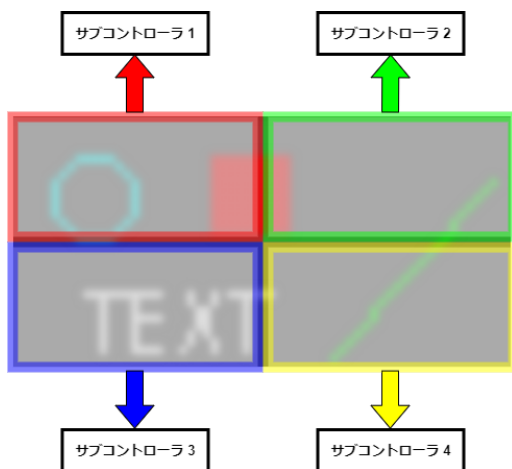


図 11 RGB データの送信イメージ

これらのランタイム機能の実装により、ハードウェア構成やプログラムなどの変更に対応した実装の修正や追加を容易に行うことができる。

### 5.2 シミュレータ

このディスプレイシステム向けのアプリケーションを開発する際には、少しぼやけた表示で実際のデザインの見え方を確認したり、デバイス上でタッチイベントなどの操作を確認したりする必要があるため、キッチンの天板の背面などにディスプレイデバイスを設置した実際の環境を利用

しなければならない。そこで本研究では、スマートフォン向け開発環境である Android Studio や Xcode などのように、PC などの端末上でアプリケーション開発に利用できるシミュレータ機能を開発した。このシミュレータ機能を使用することで、アプリケーション開発者は、実際のデバイスを接続していない状態でも、リアルタイムにぼかし表示やタッチイベントなどの操作を確認することができる。

シミュレータは図 12 のように、2つの画面を表示する。上の画面は、マトリクス上に配置された各チップ LED の色と点灯状態を表示し、下の画面は、人工大理石の天板を介して見た際のぼかしの入った表示を再現する。このようなぼやけた表示を再現するために、シミュレータでは画面にガウシアンフィルタを適用し、ドットをマトリクス上に配置して全体の画面を再現している。

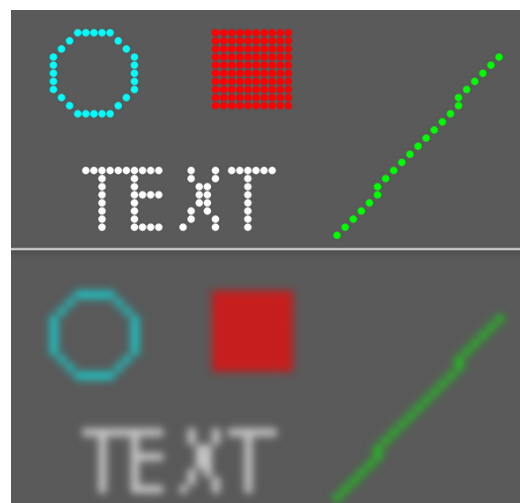


図 12 シミュレータ画面の例

このシミュレータ機能により、実機を使った動作確認が難しい場合でも、いつでもどこでも表示されるアプリケーションの表示内容や操作などを確認することができ、アプリケーション開発を効率的に行うことができる。

### 5.3 アプリケーション例

本研究で開発したディスプレイデバイスを用いたアプリケーションの例を図 13 に示す。

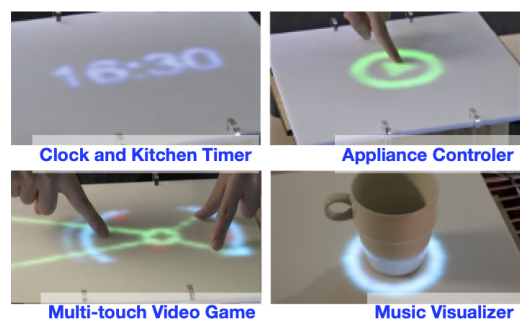


図 13 アプリケーション例

図 13 の左上のアプリケーションは、キッチンタイマーや時計アプリであり、料理の作業中などにわざわざスマートフォンを手にとって確認する必要がなく、キッチンの天板表面に時間が表示されることで、料理の作業を効率的に行うことができる。

また、図の右上は音楽プレイヤー、テレビ、エアコン、照明などの荷電制御アプリの例である。これらのアプリケーションでは、既存の家電製品を接続し、キッチンや洗面所からリモコンとして家中の家電を操作することができる。

図の左下は、3本指で遊べるマルチタッチゲームの例である。これは大理石の天板上を動き回る赤い敵オブジェクトを撃つシューティングゲームである。ディスプレイ上の3点をタッチすると、それらの点を通る円の中心に緑色の照準が表示され、その位置に弾を発射することができる。

図の右下は、音楽ビジュアライザアプリで、音楽のテンポや音量に合わせて、コップを囲む円の表示が変化する。このアプリケーションでは、キッチンの天板表面上の様々な物体に対する領域検出機能を利用しており、例えば料理中にキッチンでまな板の縁を囲むようなデザインの表示を楽しむことができる。

## 6. おわりに

本研究では、人工大理石透過型 LED タッチディスプレイ (MarbLED) をコンピューティングプラットフォームとして使用できるものにするため、ハードウェアとソフトウェアの両面から取り組んだ。ハードウェアには、表示の高輝度化や基板のモジュール化によって多様な環境で動作を可能とする機能の追加と改善を行った。またソフトウェアの面からは、MarbLED システムにおけるアプリケーション開発を容易なものにするためミドルウェアの開発とシミュレータの開発を行った。今後は、MarbLED 基板の制御を見直すことでより高解像度のセンシングを行えるように改良を行う予定である。それに伴って、より安定した位置が得られるよう物体検出の手順に対して変更を加える必要がある。また、ソフトウェアとハードウェアの統合も進めており、具体的なアプリケーションの表示・操作や、実践的な適用についても進めていきたい。

## 参考文献

- [1] BONANNI, L.: CounterIntelligence : Augmented Reality Kitchen, *Extended Abstracts of Computer Human Interaction (CHI) 2005*, (online), available from (<https://cir.nii.ac.jp/crid/1572824500223078784>) (2005).
- [2] Suzuki, Y., Morioka, S. and Ueda, H.: Cooking Support with Information Projection onto Ingredient, *Proceedings of the 10th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction, APCHI '12*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 193–198 (online), DOI: 10.1145/2350046.2350084 (2012).
- [3] Luo, F., Poslad, S. and Bodanese, E.: Kitchen Activ-

ity Detection for Healthcare using a Low-Power Radar-Enabled Sensor Network, *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7 (online), DOI: 10.1109/ICC.2019.8761484 (2019).

- [4] Kaila, L., Raula, H., Valtonen, M. and Palovuori, K.: Living Wood: A Self-Hiding Calm User Interface, *Proceeding of the 16th International Academic MindTrek Conference, MindTrek '12*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 267–274 (online), DOI: 10.1145/2393132.2393191 (2012).
- [5] Tada, T. and Hirai, S.: Transmissive LED Touch Display for Engineered Marble, *Adjunct Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20 Adjunct*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 145–147 (online), DOI: 10.1145/3379350.3416162 (2020).
- [6] Olwal, A. and Dementyev, A.: Hidden Interfaces for Ambient Computing: Enabling Interaction in Everyday Materials through High-Brightness Visuals on Low-Cost Matrix Displays, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '22*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3491102.3517674 (2022).
- [7] Ura, C., Kano, H. and Hirai, S.: Development of a Transmissive LED Touch Display for Engineered Marble, *2023 International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-Taiwan)*, IEEE, pp. 23–24 (2023).
- [8] Kaltenbrunner, M. and Ehtler, F.: The TUIO 2.0 Protocol: An Abstraction Framework for Tangible Interactive Surfaces, *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 2, No. EICS (online), DOI: 10.1145/3229090 (2018).