

# 布に写実性のある画像を描画するデバイスの提案

山本 匠<sup>1,a)</sup> 杉浦 裕太<sup>1,b)</sup>

**概要：**本研究では、毛の方向の差異により布に濃淡が異なる跡が付く現象を利用し、カーペット等の布を視覚ディスプレイ化するデバイスを提案する。先行研究と比較して、解像度の向上と、ハーフトニング処理による疑似的なグレースケール化を実装することにより、より写実的な画の描画を実現した。また、カメラと AR マーカを用いてデバイスの位置と傾きを取得することにより、デバイスのサイズを超えた大規模な描画を可能とした。

**キーワード：**入出力装置, インタラクション/インタフェース, 表現方法, アート/デザイン

## 1. はじめに

視覚ディスプレイは、コンピュータから人間への情報提示を行う役割を担っている。一般的に視覚ディスプレイは液晶で作られているが、生活空間で大型視覚ディスプレイを使う場合を想定すると、目に眩しく、電力を消費してしまうほか、大きな空間領域を占有してしまうといった問題点がある。これに比べ、プロジェクションを用いたディスプレイ [4] は空間にある壁やモノに直接投影することが可能であり、空間領域を占有する心配がなく、生活空間においての視覚ディスプレイとしては有用である。しかし、電力消費が多く、明るい場所では見えにくいという欠点もある。ユビキタスコンピューティングの時代において、住環境においての視覚ディスプレイは、生活環境に溶け込みつつ、電力消費などが少ないこと、使用する居住者の負担が少ないこと、空間領域を過剰に占有しないことが重要である。非発光ディスプレイとしては、フォトクロミックインクを用いて床面への情報提示を行う研究 [1] などが行われているが、インクは表面に塗布する必要があるため、インクを消す際に大きな時間がかかるという点で不便である。

生活空間の中で欠かせないのが、カーペットやソファ、クッションなどの布製品であり、これらは生活必需品、嗜好品、装飾品として人々を支えている。その中でもカーペットは、複数人で集まってくつろぐ場において古来から用いられてきた。カーペットは、住宅の床に敷くことで、床に直接座る場合と比べて利用者の身体的負担を軽減する。また、模様が付いたカーペットを使用することで居住空間に

おける装飾品としての役割を果たす。

カーペットの装飾品としての役割に着目し、カーペットをディスプレイ化する手法を提案した先行研究として杉浦らの Graftii Fur がある [9]。この研究では、布の傾く方向の差異によって濃淡が異なる跡ができる現象に着目し、デバイスを用いてカーペットに跡を付けることで、特殊な加工を施すことなしにカーペットを情報提示ディスプレイとして活用する。既存のカーペットを用いることで過剰に空間領域を占有することがない点、非発光であるためユーザの目に悪影響を及ぼさない点、手で触ることで描画を消すことができ利便性が高い点を考えると、住環境に適したディスプレイだと言える。しかし、描画可能な画の解像度が低く、黒白の二値でしか表現できず、視覚ディスプレイとしての機能が制限されているという問題点がある。これらのディスプレイとしての機能の制限は、表現できる画の写実性の制約につながる。

そこで本研究では、先行研究と同様の原理で描画を行いながら、より写実性のある画を描画する手法を提案する。先行研究ではハードウェアの構造に解像度が依存していたが、本研究でハードウェアデバイスを改善し、解像度の向上を実現した。具体的には、サーボモータの個数を減少させつつ 2 つのリニアアクチュエータを導入した。またディザ法を実装したことにより、黒と白の二値のみで疑似的なグレースケールを表現することを可能にした。これにより、先行研究と比べディスプレイとしての機能が拡張され、描画画像の写実性を向上させた。さらに AR マーカをデバイスに付け、カメラを用いて位置を取得することにより、解像度の向上とグレースケール化を実現しながら大規模な描画を行うためのシステムを開発した。

<sup>1</sup> 慶應義塾大学

<sup>a)</sup> imuka06x17@keio.jp

<sup>b)</sup> sugiura@keio.jp

本研究の学術的貢献は以下にまとめる。

- (1) 解像度向上による写実性の向上
- (2) 疑似的なグレースケール化の実装による写実性の向上
- (3) 上記を実現しながら大規模な描画を行う手法の提案

## 2. 関連研究

### 2.1 ディスプレイ化する対象物の材質特性に応じた手法

公共空間におけるパブリックディスプレイの研究については、ディスプレイ化する対象物の材質の特性に応じた手法が提案されている。杉浦らは、カーペットなどの布をディスプレイ化する Graffiti Fur [9] に加え、同様の原理で芝生をパブリックディスプレイ化する手法を提案した [10]。砂に対しては、自走式で描画を行うロボットである BeachBot が提案されており、レイザースキャナと反射ポールを用いて描画範囲と描画位置を決定することにより、砂浜に大規模な描画を実現している [6]。Polka は、スプリンクラのように水を射出することで土やアスファルトに描画を行う [5]。SweepScreen では、電磁石の列で構成されたデバイスを磁気泳動上を動かすことで、自由形状画像を生成する手法を提案しており、デバイスの位置を光学マウスセンサーを用いて追跡している [3]。

本研究も、カーペットという対象物体の特性を利用して情報提示を行っているため、上記と同様の手法に分類される。

### 2.2 床面への物体付着による情報提示

これに対し、ディスプレイ化する対象物体の材質に依存せず、前章で述べたようなフォトクロミックインクを用いて床面への情報提示を行う研究 [1] のように、特定の物質を付与することで描画を行う手法も提案されている。川名は、印面形状が電気制御可能なスタンプデバイスである dotanco を開発し、静的であった印面形状に時間軸を与えることにより、拡張性や新たなインタラクションを創出することを提案した [2]。Sustainabot では、携帯電話の他にデジタルデバイスを持っていない発展途上国の人々を対象に、食材や粉末などの素材をパターン状に付着させている [8]。

### 2.3 実世界におけるファブリケーションの支援

実世界での切削等のファブリケーションを支援するための研究も存在する。Rivers らが開発した切削支援ツールは、切削面に対して AR マーカを貼り、デバイス自身にカメラを付けることによってデバイス自身の位置推定を行っている [7]。FreeD は磁気式モーショントラッキングシステムを用いた 3D モデルの切削支援を行うデバイスで、人間の切削における楽しみを重視しつつ、想定されるモデルと大きく異なる領域を切削しようとした場合にのみ、機械が補助を行う [11]。

これらの研究と本研究ではデバイス自身の位置推定を行うという点が類似している。

## 3. 高解像度に描画するデバイス

### 3.1 先行研究におけるハードウェアデバイスとその問題点

先行研究 [9] においては、ローラー型デバイス、ペン型デバイス、遠距離力照射型デバイスを用いて描画を行う。ローラー型デバイスは、事前にユーザが入力したデータを描画することを簡単に行うことができる。ペン型デバイスは、ユーザが自らの手で描画を行うことを想定したデバイスである。遠距離力照射型は、非接触で縦置きの場合にも自動描画が可能であるが、毛足が長い素材にのみ描画可能である。3種類のデバイスはそれぞれ使用する目的や場面が異なるが、本研究ではユーザが入力した画像を写実的に描画することに主眼を置いているため、ローラー型デバイスに関して描画原理と問題点を記す。

ローラー型デバイスは、底面に毛を逆立てるための 16 個のサーボモータで構成されている。それぞれのサーボモータには描画用のバーが取り付けられている。バーが下ろされている場合、バーが毛にあたり毛が逆立つことで描画を行う。片方の車輪の車軸にはロータリーエンコーダが取り付けられており、回転に応じて水平方向の移動距離を計算する。これにより、適切な位置に適切な画素を描画することができる。

ローラー型デバイスでは、解像度が 16 個のサーボモータの機構に依存する。描画の高解像度化を行うためには、毛と接地面であるバーの形状を小さくすれば良い。バーの形状を単純に小さくした場合、隣のサーボモータとの間隔が空いてしまい、ピクセル間に間隔が空いてしまう。この問題を解決するには、サーボモータの連結機構を改良する必要がある。しかし、サーボモータの物理的サイズの小型化には限りがあるため、先行研究以上に密接した機構を実現できたとしても、解像度の向上には限りがある。

### 3.2 本研究におけるハードウェアデバイスの構造

本研究では、リニアアクチュエータを用いて 1 つのサーボモータを動かすことによる描画を提案する。先行研究のように 16 個のサーボモータを連結した機構ではなく、サーボモータの個数を減らしリニアアクチュエータを導入することにより、解像度は機構の構造ではなく、リニアアクチュエータの分解能に依存するため、先行研究と比較して解像度の向上が実現できる。

本研究で用いたハードウェアデバイスは図 1 の通りである。XY-Plotter Robot Kit<sup>\*1</sup> という既製品を基に作成している。XY-plotter は 2 つのリニアアクチュエータを用いて、描画部を 2 次元の所望の位置に動かすことができる。

<sup>\*1</sup> <http://learn.makeblock.com/en/xy-plotter-robot-kit/>

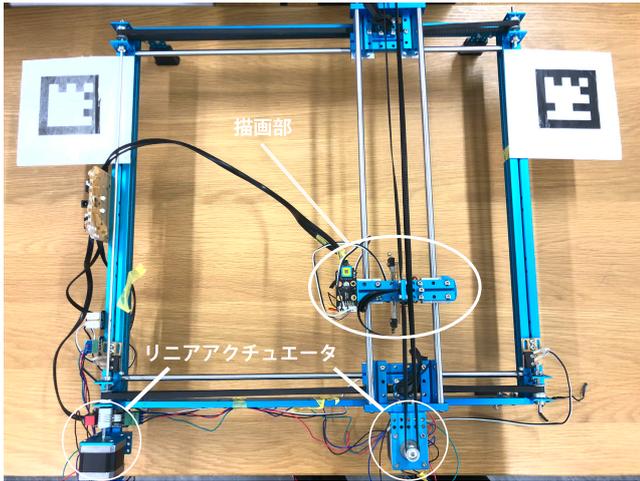


図 1 デバイスの全体図

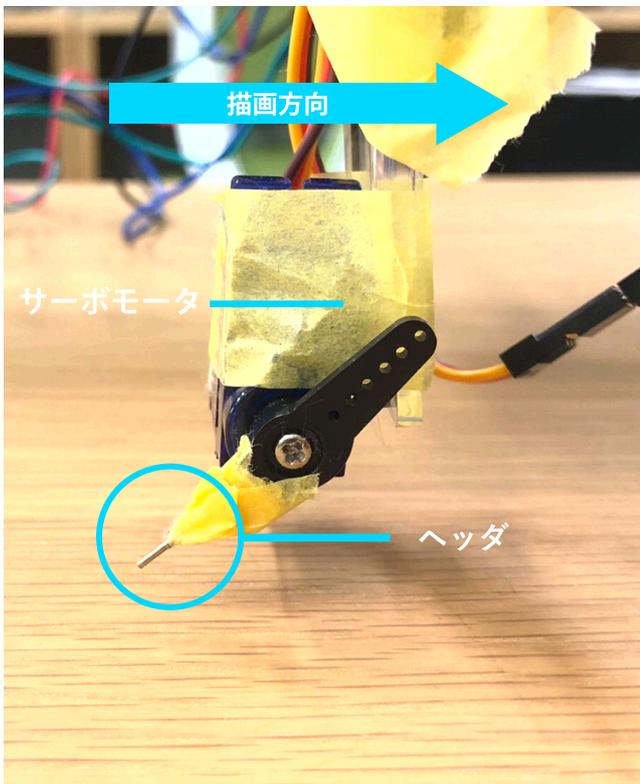


図 2 デバイスの描画部

描画部は図 2 の通り、描画用のヘッド部が取り付けられたサーボモータから構成されており、サーボモータがヘッド部を動かすことにより毛の方向を変える。サーボモータとリニアアクチュエータは Makeblock Orion<sup>\*2</sup> と呼ばれる arduino Uno をベースとして作られたメインボードによって制御される。さらに大規模描画のために、2つの AR マーカを取り付けている。これに関しては 5 章で説明する。

#### 4. グレースケール化

序論でも述べた通り、黒と白のみの表現では表現できる

<sup>\*2</sup> <http://learn.makeblock.com/makeblock-orion/>

0	8	2	10
12	4	14	6
3	11	1	9
15	7	13	5

図 3 ディザパターン



図 4 2 値化画像の描画結果 (左) とディザ法画像の描画結果 (右)

画の写実性が制限されてしまう。そこで、黒と白の 2 値でグレースケールを疑似的に表現するディザ法を実装した。

##### 4.1 ディザ法

ディザ法は、黒白の 2 値のみで疑似的にグレースケールを表現するためのフィルタリング処理である。本研究では、ディザ法の中の一つである組織的ディザ法によるハーフトニング処理を行った。まず、画像中の画素を  $4 \times 4$  のブロックに分割する。この時、1 画素が 256 階調で表現されているとする。次に、ブロック中の画素とディザパターン (図 3) を比較し、画素が (対応するディザパターンの値)  $\times 16 + 8$  以上であれば白、それではなければ黒と判定することができる。

##### 4.2 ディザ法によるグレースケール化を行った画像と 2 値のみの画像の描画結果の比較

実際にハードウェアデバイスを用いて、描画のテストを行った。布に描画される画の解像度は  $100 \times 100$  としたため、入力画像の解像度も  $100 \times 100$  に変更して描画を行った。

図 4 が 2 値化画像の描画結果とディザ法画像の描画結果である。ディザ法画像の結果は、黒白の二値以上に陰影などのグレースケールの表現ができており、2 値画像の結果よりも写実性が向上したと考えられる。

#### 5. 大規模描画

本研究で使用しているリニアアクチュエータの可動範囲は  $390\text{mm} \times 310\text{mm}$  である。カーペット等の布をディスプレイ化する場合、描画したい範囲はリニアアクチュエータの可動範囲よりも大きいため、カーペット一面をディス

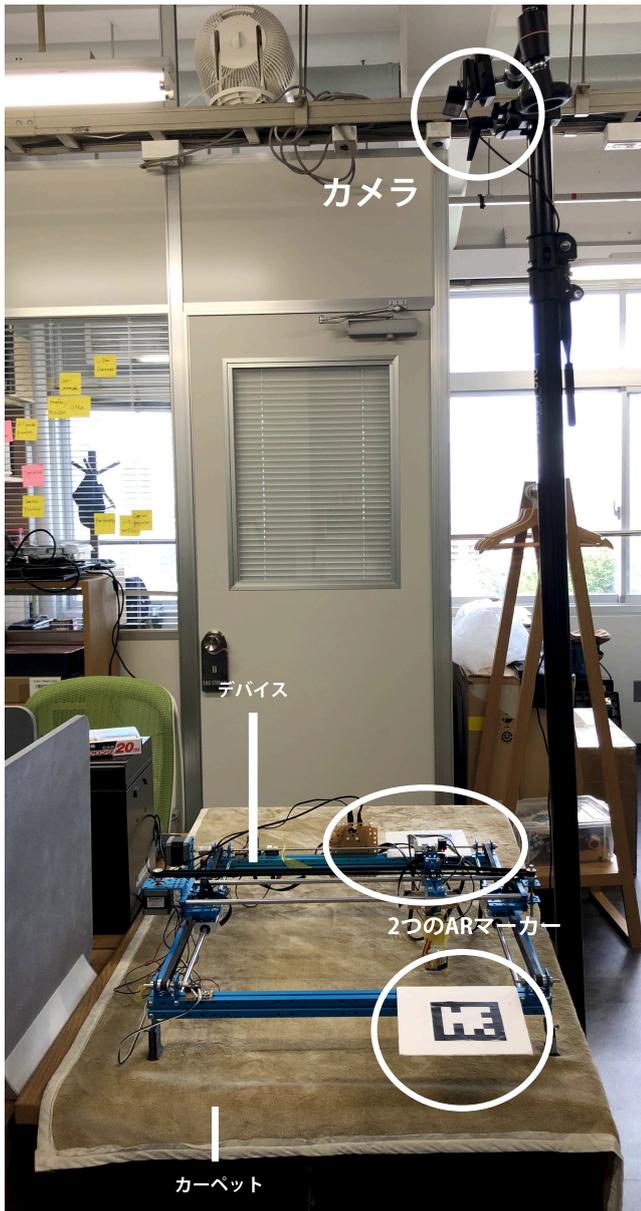


図 5 大規模描画のためのシステム

プレイ化するためにはデバイス位置を動かしながら描画を行う必要がある。

先行研究 [9] では、複数行での描画を行う際には手動で位置合わせを行うことで大規模な描画を行っている。しかし手動での位置合わせをすることは容易ではなく、ユーザ自身が丁寧にデバイスの位置合わせを行わなければならない、使用するユーザ自身のある程度の技術が必要であると考えられる。

そこで本研究では、デバイスに AR マーカを取り付けカメラを用いて上から撮影することにより、デバイスの位置推定を行う。ユーザは自らの手で精密な位置合わせを行うのではなく、任意の位置にデバイスを設置しソフトウェア上で操作を行うだけでカーペットに部分画像を描画できる。描画と手動でのデバイスの位置変更を繰り返しながら大規模描画を実現することができる。

## 5.1 大規模描画のためのシステム

システムを図 5 に示す。

XY-Plotter には、2つの AR マーカをデバイスに対して同じ角度になるように固定した。まず、カメラを床面に対して真上に固定し、可能な限りカーペットに対する傾きが生じないように設置した。この時、撮影画像の中にカーペット全体が映るように設置した。次にデバイスをカメラの対する傾き角度が 0 度となるように設置し、描画領域の隅を描画し、カーペットの 4 隅 (描画したい全体の領域の 4 隅) と描画領域の 4 隅の座標を取得した。デバイスの傾き角度は、2つの AR マーカの座標のタンジェントから取得でき、ソフトウェア上で表示できるようになっている。傾きの角度は 1つのマーカの座標のみでも取得できるが、本研究のシステムではマーカの座標取得精度はカメラの解像度に依存するため、マーカを二つ導入することで角度の取得精度が向上する。カーペットの 4 隅と描画領域の 4 隅の座標に関しては、ポインティングによってソフトウェア上で座標を取得できるように実装した。4 隅は、

- 真上からの撮影が行われている
- カメラに対するカーペットの傾きが生じていない

という二条件が満たされていれば長方形になるが、現実的には以上の条件を完全に満たすことは困難であるため、4 隅を長方形として近似を行った。さらにデバイスを動かさなまま、AR マーカの 4 隅の中の 1 点を原点とした際の描画領域の 4 隅の相対位置座標を計算してプログラムに書き込んだ。AR マーカの 1 点と描画領域の 4 隅の相対位置関係は、カメラに対するデバイスの傾きが 0 度と仮定した場合は変わらない。デバイスの傾きが 0 度ではない場合にも、取得したデバイスの傾きに応じて描画領域の 4 点の座標に対して幾何学変換を行うことにより、適切な描画領域の 4 点の座標を可能にした。以上の処理によって描画領域の座標とカーペットの 4 隅の座標が取得でき、入力した画像から描画できる部分画像を取得することができる。また描画する領域が重なった場合でも、一度描画された場所が上書きされないように部分画像を取得した際に一度描画済みの画素は白く塗りつぶす処理を実装している。

## 5.2 ソフトウェアの実装

画像入力などのソフトウェアは Processing を用いて実装を行った。Processing 上の画面で画像を入力し、入力画像の大きさをカーペットの大きさに変更し、グレースケール化やディザ法などの画像処理を行う。デバイスの位置決めを行った後、ボタンを押すことで部分画像を取得でき、実行ボタンを押すと Makeblock Orion とシリアル通信を行い、デバイスが描画を行う。

## 5.3 大規模描画の結果

以上のシステムを用いて大規模描画のテストを行った。1



図 6 大規模描画のためのシステム

ピクセルの幅は約 3mm とした。これは隣接するピクセル間の幅をなるべく小さくしつつもピクセル同士が重ならないようにした結果である。リニアアクチュエータの可動範囲が 390mm×310mm であることを考えると、デバイスを固定した際に一度に描画できるピクセルは最大でも 130×103 ほどである。今回は一回に行う描画を 100×100 としている。実際に 100×100 をすべて黒く塗りつぶすような描画を行ってみると、長方形の大きさは 34.7cm×28.2cm であった。よって 1 ピクセルのサイズは 0.347cm×0.282cm である。

結果を図 6 に示す使用したカーペットのサイズは 150cm×200cm であったが、カメラの視野角の関係上その全面に描画をすることはできず、実際に描画時に使用したのは 130cm×170cm 程度であった。結果としてデバイスのサイズを超えた大規模描画を実現した。先行研究 [9] と描画結果を比較すると、波のしぶきや岩肌の様子に着目すると本研究の結果の方がより解像度が高く、写実的に表現できていることが分かる。

## 6. 議論と制約

### 6.1 描画時間

本研究で用いた手法では、描画時間が非常に長い。100×100 のピクセルがすべて黒だった場合に描画を行った際、1 回の描画にかかったのは約 52 分であった。また、大規模描画に関しては約 8 時間 30 分ほどであった。解像度と描画時間はトレードオフの関係であると考えるが、描画する順序を最適にするアルゴリズムの実装や、同時に可動できるリニアアクチュエータを複数にするようにハードウェアデバイスに改良を行い並列処理を実装などを行うことで、描画時間が短縮できる可能性がある。

### 6.2 ロボット化

1 回の描画が終わる度に手動でデバイスの位置を変更す

る必要がある。これは非常に手間がかかりユーザへの負担が大きい。デバイス自身を自走式ロボット化することで、自動で位置を動かせるようにすることで改良できると考えられる。

### 6.3 位置合わせのためのアプローチの検討

位置合わせのためのシステムには今回は AR マーカとカメラを用いたが、カメラの設置位置がカーペットから離れるにつれて、位置座標の検出精度が低下してしまうという問題がある。一般的にこのようなシステムの位置座標取得精度と位置座標取得システム導入に必要なコストは、トレードオフの関係にあると考えられる。この問題に対処する解決策としては、[11] で用いられているデバイスのように取得精度の高いデバイスを用いることなどが考えられるが、[7] のようにデバイス自身にカメラを固定、カーペット自体に AR マーカを固定して自己位置を取得するというアプローチも考えられる。

### 6.4 ハードウェアデバイスの細かな改良

デバイスの角度の傾きが非常に大きくなった場合、サーボモータの向きをデバイスの角度に応じて変更する必要がある。これに関しては描画部分にもう一つ機構を取り付け、サーボモータ角度をデバイス角度に応じて変更することで改善できると考えられる。

図 6 を見るとデバイス自身の足跡が描画結果から見られるのが分かる。これに関しては足跡が付かないようにデバイス自身を改良する必要がある。

### 6.5 描画する布の毛の特性に対する検討

本研究で用いたカーペットの素材はマイクロエード性で毛の長さが 4mm、繊維径が 0.02mm であった。描画時の画の出方はカーペットの毛足の長さや材質に依存すると考えられ、カーペットの材質と画の出方の関係も今後の検討事項であると考えられる。

## 7. 終わりに

カーペット等の布に画を描画するデバイスに関して、先行研究 [9] と比較して高解像度化とグレースケール化により画の写実性を向上させ、大規模に描画するシステムの提案を行った。今後は描画時間の短縮のための検討やロボット化による完全自動化について取り組んでいく。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP20H04228 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Daniel Saakes, Takahiro Tsujii, K. N. T. H. and Naemura, T.: Photochromic Carpet: Playful Floor Can-

- vas with Color-Changing Footprints, Vol. 8253, p. 622–625 (2013).
- [2] Kawana, H.: dotanco, <http://gekitetz.com/dotanco/> (2013). (Accessed on 06/05/2021).
  - [3] Mourouzi, C., Qamar, I. P. S. and Roudaut, A.: SweepScreen: Sweeping Programmable Surfaces to Create Low-Fi Displays Everywhere, *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–6 (online), DOI: 10.1145/3170427.3188462 (2018).
  - [4] Müller, J., Eberle, D. and Schmidt, C.: *BaseLase: An Interactive Focus+Context Laser Floor*, p. 3869–3878 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702246, Association for Computing Machinery (2015).
  - [5] Nagafuchi, R., Matoba, Y., Ikematsu, K., Ishii, A., Kawahara, Y. and Siio, I.: Polka: A Water-Jet Printer for Painting on the Grounds, AVI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3399715.3399817 (2020).
  - [6] Research, D. and a student team at ETH Zurich: BeachBot, <http://www.beachbot.ch/>. (Accessed on 06/27/2021).
  - [7] Rivers, A., Moyer, I. E. and Durand, F.: Position-Correcting Tools for 2D Digital Fabrication, Vol. 31, No. 4, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2185520.2185584 (2012).
  - [8] Robinson, S., Pearson, J., Holton, M. D., Ahire, S. and Jones, M.: Sustainabot - Exploring the Use of Everyday Foodstuffs as Output and Input for and with Emergent Users, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300456 (2019).
  - [9] Sugiura, Y., Toda, K., Hoshi, T., Inami, M. and Igarashi, T.: Graffiti Fur: Turning Your Carpet into a Computer Display, *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2614066.2614085 (2014).
  - [10] Sugiura, Y., Toda, K., Kikuchi, T., Hoshi, T., Kamiyama, Y., Igarashi, T. and Inami, m.: Grassfit: Drawing Method to Produce Large-Scale Pictures on Conventional Grass Fields, TEI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 413–417 (online), DOI: 10.1145/3024969.3025067 (2017).
  - [11] Zoran, A. and Paradiso, J. A.: FreeD: A Free-hand Digital Sculpting Tool, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2613–2616 (online), DOI: 10.1145/2470654.2481361 (2013).