

学士論文

電子ペーパーを用いた環境決定的変数による装置統合
型ビジュアル生成手法の研究
《createdAt:》制作を通して

2026 年度

指導教員 杉本達應

(23244002)

坂村 空介

東京都立大学
システムデザイン学部
インダストリアルアート学科

提出日：2026 年 1 月 31 日

電子ペーパーを用いた環境決定的変数による装置統合型ビジュアル
生成手法の研究
《createdAt:》制作を通して

要旨

最後に書きまーす

A Study of Device-Integrated Visual Generation Using Environment-Determined Variables with Electronic Paper Display: Through the Production of "createdAt:"

Summary

write this section later

目次

要旨	i
Summary	ii
1 序論	1
1.1 概要	1
1.2 背景	1
1.3 目的	2
2 先行事例・関連研究	3
2.1 アート文脈におけるデジタル作品と物質性	3
2.2 ランダムネスと作家性	4
2.3 System Art と装置としての作品	4
2.4 電子ペーパーという表示装置の特性・課題	5
3 コンセプト・設計思想	6
3.1 デジタルアートのあり方を再考する3つの視点	6
3.2 内部構造による複製可能性の排除	6
3.3 作家による意図の排除	7
3.4 環境との関係性とプロセスの透明化	8
4 システム構成	9
4.1 ハードウェア構成	9
4.2 ソフトウェア構成	9
5 実装・展示	11
5.1 装置の制作	11
5.2 作品の提示手法について	12
6 結論・考察	13
参考文献	14

1 序論

1.1 概要

本研究では、複製可能性を内在するデジタルデータによるアート作品のあり方を問題設定とし、複製可能性を本質的に排除する形で作品の生成・提示を一貫して行うことがシステムの構築を目指したものである。

制作物として、電子ペーパーを表示装置とした装置統合型ビジュアル生成手法を提案、《createdAt:》と題して作品制作を行う。アルゴリズムによって作品生成を行うジェネラティブアートの手法をとり、本システムで生成・提示されるビジュアル作品は、画像ファイル等のデジタルデータとしては生成・保存されない。表示装置である電子ペーパーの表示処理を通じて電子ペーパーに書きこまれることによって初めて視覚情報として提示される。

実行される環境（場所・時間・実行者）の情報によってアルゴリズムが使用する変数の値が決定されることから、デジタルデータが生成される際に作成時刻を示すメタデータとして付与される項目「createdAt」に由來したタイトルを冠した。デジタルデータに伴うメタデータはアート作品に関わらず付与されるもので、汎用的なものでありデータ自体に意味を加えるものではない。しかし、本研究では生成される作品とメタデータのような周辺情報および生成装置を不可分な関係として取り扱うため、その姿勢をタイトルとした。

実体のある装置が実行環境の情報を利用しながら、その環境によってビジュアル作品を生成・提示するという、デジタルデータでありながらも実体感と固有性を持ち合わせ、装置と一体になったビジュアル作品を作成することが本研究の目的である。

1.2 背景

デジタル技術によって制作されるアート作品は技術の発展によって任意の表示装置を通じて多様な形で提示・閲覧されることが前提とされ、高い移植性と再現性を確保した。一方で、複製の容易さ故に作品としての実体感や固有性・唯一性が希薄化している。

Walter Benjamin は「複製技術時代の芸術作品」において複製技術によって作品のアウラが消失したことを指摘。デジタルデータを前提とした作品は劣化なく完全に同一の複製を生成できる点においてアウラの消失と共にオリジナルとしての作品の消失にも加担した。

これに対し、2010 年代には NFT 技術が注目を集めた。しかし、この技術は外部的にデジタルデータへ唯一性を付与するにすぎなかつたため、作品自体の構造を変化させるものでは

なかつた。また、投機的な市場の加熱により正当な検証が行われないまま投機文脈において収束を迎えた。

一方、20世紀美術においては作家による制御を放棄して偶然性や外部要因を作品生成に取り入れる手法が検討された。これらの手法は乱数の利用としてデジタルアートにも利用されるが、そこには20世紀美術で試行されたランダムネスの利用とは異なる側面があり、作品としての文脈を失う恐れをはらんでいる。

また、1960年代に登場したSystem Artにおいてはモノ自体ではなく作品制作のプロセスやシステム自体が芸術であるという考え方方が登場した。この立場では作品がおかれる環境は作品と切り離された要因ではなく作品成立の重要な一因とされた。

電子ペーパーは、低消費電力で利用可能な紙のような視認性を持つ表示装置であり、情報提示装置として電子書籍端末やサイネージとして利用される。しかし、アート表現においては既存ディスプレイの代替手段に止まっており、その表示特性や処理プロセスそのものに焦点を当てた実践は十分ではない。

1.3 目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、電子ペーパーの表示特性を生成プロセスの一部として組み込み、デジタル作品の生成と提示を不可分な状態とした装置統合型ビジュアル生成手法を提案する。実行環境の情報を変数決定に利用しながら、生成結果をデータとして保存せずに表示装置である電子ペーパー上でのみ成立させることで、デジタル作品における固有性・唯一性・不可逆性を再考することを本システムの目的とする。

2 先行事例・関連研究

2.1 アート文脈におけるデジタル作品と物質性

デジタル技術により、画像・映像等の作品、またそれらを生成・実行するプログラム等はデータとして生成・保存され、任意の表示装置を通じて提示されることが前提となっている。これにより、デジタル作品は場所や時間の制限を受けずに複製・再編集・再配置が可能となり、高い移植性と再現性を得ている。一方で、複製の容易さゆえに作品と提示装置が分離され、提示装置としてのハードウェアの設計や実行環境は作品の外部要因として扱われることで、提示手法が透明化され、デジタル作品の実体感や固有性、唯一性を希薄化させる要因となっている。

デジタルデータは本質的に複製可能性をもち、同一のデータから全く同一の情報を無数に複製できる。このようなアート作品文脈における複製可能性の問題は Walter Benjamin が「複製技術時代の芸術作品」[1]において論じたアウラの消失という論と接続できる。Benjamin は写真や映画といった機械的な複製技術の発展によって作品が特定の場所や時間と共に一回的に存在し、「いまここ」的性質によって成立していた「アウラ」が失われると指摘、複製技術は作品の唯一性や歴史性などの権威的なものを解体する契機となるとした。デジタルデータを前提とした作品は、Benjamin が論じた複製技術によるアウラの消失を超えて、劣化なく完全に同一の複製を生成できる点において、Benjamin が想定する状況を推し進めただけでなく、機械的な複製によるアウラの消失が唱えられた時代において存在した「オリジナル」としての作品をも消失させた。その結果、デジタル作品は場所や時間から切り離され、提示・閲覧において高い再現性を獲得する一方で、作品としての固有性や実体感、「オリジナル」の欠如といった構造を内包している。このような問題視きは、作品の唯一性をどのように担保するかという議論として引き継がれており、多くの場合その解決方法は作品の生成・提示手法そのものではなく、外部的な制度や技術に委ねられてきた。

デジタルデータが本質的に複製可能であることから、その「オリジナル」としての固有性や唯一性は担保されにくいという性質・課題をはらんでいる。2010 年代後半には、ブロックチェーン技術を用いた NFT（非代替性トークン）アートがデジタルデータに唯一性を付与、その固有性を担保する手法として注目を集めた。[2] NFT は発行・所有・取引履歴を記録することで、デジタルデータの希少性を外部的に担保する仕組みを提供したが、多くのデジタル作品そのものの構造的な性質を変えるものではなかった。その結果として、NFT アートはデジ

タル作品の価値を強化する一方で、その本質的な生成条件や場、物質性を与えるかといった議論が行われないまま、投機的な文脈の中で消費される状態で収束を迎えた。[3]

2.2 ランダムネスと作家性

作家による制御を放棄し、偶然性や外部要因をランダムネスとして作品生成に取り込む試みは、20世紀美術において繰り返し行われてきた。抽象表現主義の代表的な画家である Jackson Pollock はポーリングという手法で空中から塗料を滴らせて抽象的な描画を行う「アクション・ペインティング」の実践によって作家の身体性と偶然性の関係を探求[4] した。John Cage は作譜手法「チャンス・オペレーション」で多くの実践を行い[5]、『易の音楽』(1951)においてはコイントスによって作譜するなど、作家による意図を排除するために偶然性を利用して制作を行った。その後、コンピュータを利用した生成芸術においても、乱数やアルゴリズムによる非決定的な生成手法が取られてきた。しかし、多くの場合においてランダムネスはプログラム内部で完結する数値の利用として扱われ、実行環境は生成時点のコンテキストが利用されることはない。本研究では、変数決定において作家による意図を排除する上記のような考え方を踏襲しつつ、乱数や偶然性ではなく、実行される環境（場所・時間・実行者）を変数決定の要因として組み込む点に特徴がある。

2.3 System Art と装置としての作品

1960-70年代に登場した芸術運動 Systems Art の中で、Jack Burnham が提唱した System Esthetics[6] では、固定された「モノ」ではなく、人間や環境、テクノロジーが複雑に絡み合う関係性やプロセスやシステムなどの相互作用そのものが芸術だとする考え方が登場した。電話による口述で職人に構図の指示を出し、作家が素材を直接加工せずに作品制作を行った Moholy-Nagy の『EM 2 (Telephone Picture)』では、アイデアが作品の中心であり、実作はそれを実現するメディアに過ぎないという態度を示した。Hans Haacke は『Condensation Cube』(1963-1967)[7]において、オブジェクトが存在する環境の状態が作品に反映され、鑑賞者が環境を構成する要素として作品に介在することで、オブジェクトと環境、鑑賞者が生きている 1 つのシステムとして成立する作品を提示した。System Art 運動は作家によって制作・固定化されたモノとしての作品観を批判し、作品を成立されるプロセスや環境、相互作用へと作品の関心を拡張した。この立場では、制作装置や環境は作品と切り離された外部的な要因ではなく、作品成立の一部として条件を可視化する要素として提示されている。

2.4 電子ペーパーという表示装置の特性・課題

電子ペーパーは、一般的に利用される液晶ディスプレイとは異なる表示特性を持つ。特徴として、表示内容の書き換え時にのみ電力を必要とする低消費電力性、液晶ディスプレイ等と比較して書き換え時に遅延があることが挙げられる。また、バックライト方式ではなく反射型の表示による紙のような視認性を特徴とする表示装置である。これらの特性から、電子書籍端末としての利用や小売店等での情報表示、サイネージとしての利用など、情報提示装置としての利用が主とされている。^[8]一方で、アート表現においては既存ディスプレイの代替手段や、デジタルフォトフレームとしての利用に止まっており、その表示特性や描画処理のプロセスそのものに焦点を置いた実践は十分になされていない。

3 コンセプト・設計思想

3.1 デジタルアートのあり方を再考する 3 つの視点

複製可能性を内在するデジタルアートのあり方を再考し、本質的な解法を得られる生成装置を制作するにあたり、先行事例で取り上げた論考や手法から 3 つの視点から設計思想を定めた。

1 つ目が、アート作品そのものが複製可能性を排除するような内部構造を持っていること。2 つ目が、作家による意図を排除し、外部要因によって生成されること。最後に、生成される環境との関係性を明示し、生成過程を明らかにすること。以上 3 つの視点を持って作品制作を行う。

3.2 内部構造による複製可能性の排除

1 つ目の内部構造によって複製可能性を排除するという設計について、電子ペーパーを表示装置として利用することで実現可能である。デジタルアートの複製可能性は、その情報をなんらかの形でデータとして保持することに起因する。NFT 技術はそれ自体が複製不可能なトークンをデジタルデータに付与した形をとっていることから、データを保持することが前提となる。しかし、これが本質的な解決に至っていないことは先行事例の章でも述べた。よって、装置内にデータを保持せず、物理的な形を与えることが最も有効な解法であると考える。

先行事例でも取り上げた通り、電子ペーパーにはいくつかの出力・表示特性がある。その中でも、一度書き込んだデータは次に書き込み処理を行うまでの間、非電力で保持が可能であるという特性を利用する。電子ペーパーは電気泳動を用いた物理的なピクセルの移動を用いて描画処理を行い、処理完了後にその状態が定着する。一般的な液晶ディスプレイ等と異なり、画素情報をデータとして送り続ける必要がないため、画素情報の送信は書き込み処理を行う一瞬のみ必要となる。よって、生成装置自体が継続的に画素情報を持つ必要がなくなる。生成・提示の流れとして、装置内で画素情報を計算し、電子ペーパーに送信する。電子ペーパーは画素情報を電気泳動を用いて物質的なピクセルの移動によって画素情報を可視化する。画素情報は送信が完了した段階で計算装置から削除されているため、内部的なデータは持たない。計算された画素情報は電子ペーパーによって物質化された瞬間に初めて視覚化される。また同時にデータとしては削除されるため、視覚情報は電子ペーパーの上にのみ残されることとなる。この処理手順により、内部構造によってデジタルアートの複製可能性を排除することができる。

3.3 作家による意図の排除

20世紀には、ランダムネスを利用する作品の制作手法が多く試行された。作品の全てが作家のコントロール下にあって完全に制御されることを避け、作家ですら意図しない結果を得るために採られた手法とも言える。一方、デジタルアート、とりわけシステムやアルゴリズムによって生成される作品において、乱数等のランダムネスの利用は一般的だ。それは、絵筆の筆致のようなわずかな揺らぎも存在しない完全に制御されたコンピュータによる作品生成において、揺らぎを与えるための限られた手法だからである。

一般に、作品制作には描画表現に適したアプリケーションやソフトウェア、プログラミング言語のようなツールが用いられる。これらは、作品制作を容易にし、作品制作の過程では常にその表現の試行のプロセスをスクリーンを通じて確認が可能である。これには、前述の20世紀におけるランダムネス利用の試行と決定的に異なる点がある。乱数・制御できない値としてランダムネスは利用されるが、作家の制作意図の中でいくつかの表現手段やエレメントを切り替え・配置するあたり値をマッピングするためのツールとして利用されるに止まる点だ。Pollock等による作品は、完全なランダムでないのは自明だが、作品が偶然性によって描かれる経過と作品の完成が同じタイミングで発生することから、結果は制御の外にある。翻ってコンピュータによる生成は乱数のマッピングによってある程度のリミットが定められてしまう。

今回の制作では、生成される作品に可能な限り作者による意図を反映させないようにするため、次のような手法をとる。電子ペーパーを表示装置として利用することは前述の通りだが、作品を生成し、画素情報を電子ペーパーに送信するプログラムはPythonを用いて制作する。Pythonは汎用的なプログラミング言語だが、描画表現に適したものではなく、こうした分野で積極的に利用される言語ではない。本作では電子ペーパーに直接画素情報を送信し、表示にともなって初めて視覚化される生成手法をとっているため、電子ペーパーに出力されるまではどのような結果が描画されるかはわからない。

生成にあたっては後述する方式で装置が置かれる環境によって決定される変数を利用する。これらの値を2進数化して、白黒2値の電子ペーパーの画素情報として直接利用する。生成される画素情報は配列として提供される。通常の制作手順でも画素情報は配列として提供されるが、これらの違いは描画結果を前提としているか否かにある。通常の描画用ソフトウェアでは出力される表現が結果的に配列という形で提供される。一方で、本作における画素情報の配列は任意の数値列を利用しただけのものであり、そこに意図した描画表現が存在せず、配列

を可視化したという結果だ。これにより、生成される作品は一定のパターンをもった幾何学的な図形として描画され、作者により意図から離れた結果を得る。

3.4 環境との関係性とプロセスの透明化

ここでは、実体のある装置を利用することによって、作品が生成される環境と作品の関係性、生成プロセスの透明化を行う。モノそれ自体ではなくプロセス自体が作品であるという姿勢をとった System Art の発想から、本作では電子ペーパー上に示される描画表現だけではなく、それが実行されるプロセスとそのシステム自体を作品として位置付け、環境との関係性を利用し生成プロセスを明示する。

生成プロセスの透明化については、2進数化した値を直接描画表現に利用するという手順で示した単純な手法によって行われるが、ここで利用する値が環境との関係性というテーマに密接な繋がりを持つ。生成に関わる値は生成される時刻・場所情報を基本とし、実行ボタンを押下した長さによって決定される。A4 サイズの中に生成に関わる全コンポーネントが収まつた装置は容易に持ち運びが可能であり、この持ち運びの容易さは作品をホワイトキューブから解放する。時刻や実行者だけでなく実行される場所すらも自由なこのシステムは無限の描画結果を提示しながら、その結果に 1 つとして同じものはない。環境に依存した固有の描画結果は電子ペーパーによって物質的に定着し提示される。利用される値は 7 セグメント LED によって常に鑑賞者に提示され、電子ペーパー上に結実した描画結果と環境情報の強い繋がりを示唆する。

4 システム構成

ここでは、前章で述べた設計について実現した具体的なハードウェア・ソフトウェア構成を示す。

4.1 ハードウェア構成

本システムの主要コンポーネントに小型のコンピュータである Raspberry Pi 財団のシングルボードコンピュータ Raspberry Pi Zero 2 W[9] を利用する。また、提示装置には Waveshare 社の 7.5inch HD e-Paper HAT (B)[10] を採用する。実際に生成に関わるコンポーネントは以上の 2 つであるが、制作する装置には加えて、実行するためのプッシュスイッチ、時刻・位置情報を鑑賞者に提示するための 7 セグメント LED を搭載する。

4.2 ソフトウェア構成

Raspberry Pi 上で実行される描画のためのスクリプトは Python によって記述する。描画に関わる変数として取得する値は、実行される時刻、実行される場所、実行ボタンが押される時間の 3 種類で、以下のように値を利用する。

- 時刻: UNIX Time
 - 1. 実行された時刻を 10 進数の UNIX Time として取得
 - 2. ハッシュ化によって 2 進数化
 - Python ライブラリ hashlib[11] から提供される以下の 11 のハッシュ化手法を利用
 - md5
 - sha1
 - sha224
 - sha256
 - sha384
 - sha512
 - sha3_224
 - sha3_256
 - sha3_384
 - sha3_512
 - 3. 画素情報とする

- ▶ 2進数化した値を電子ペーパーのピクセル数を満たすまで複製
- 場所: 緯度経度
 1. 実行された場所の緯度経度を 2つの値として取得(lat, lng)
 - ▶ Python ライブラリ geocoder[12] を利用
 - ▶ 時刻情報を 2進数化するハッシュ化関数の選定
 - $(lat+lng) \% 11$ によって得られる 11種類の値からハッシュ化関数を決定
 - ▶ 描画表現の選定
 - $(lat+lng) \% 2 == 0$ によって得られる真偽値から以下の描画処理から 1つを選定
 1. 2進数を電子ペーパーのピクセル数を満たすまで複製した配列
 2. 1を元に Perlin Noise[13] を利用して複雑化したもの
 - ▶ Perlin Noise 使用時の変数決定
 - noiseScale
 - Perlin Noise 全体のスケール率
 - $0.01 + ((lat+lng) - \text{math.floor}(lat+lng)) * 0.09$
 - noiseScaleX
 - Perlin Noise X 軸のスケール率
 - $0.01 + ((lat) - \text{math.floor}(lat)) * 0.09$
 - noiseScaleY
 - Perlin Noise Y 軸のスケール率
 - $0.01 + ((lng) - \text{math.floor}(lng)) * 0.09$

5 実装・展示

5.1 装置の制作

装置は以下のように制作した。筐体はマット加工のアクリルパネルによって制作、全コンポーネントをねじ止めとスペーサーによって固定する。電子ペーパーの表示部分のみアクリルパネルをカットし窓を設け、その他の箇所はマット加工のアクリルパネル越しに奥行きを持つてぼんやりとした表現を目指した。

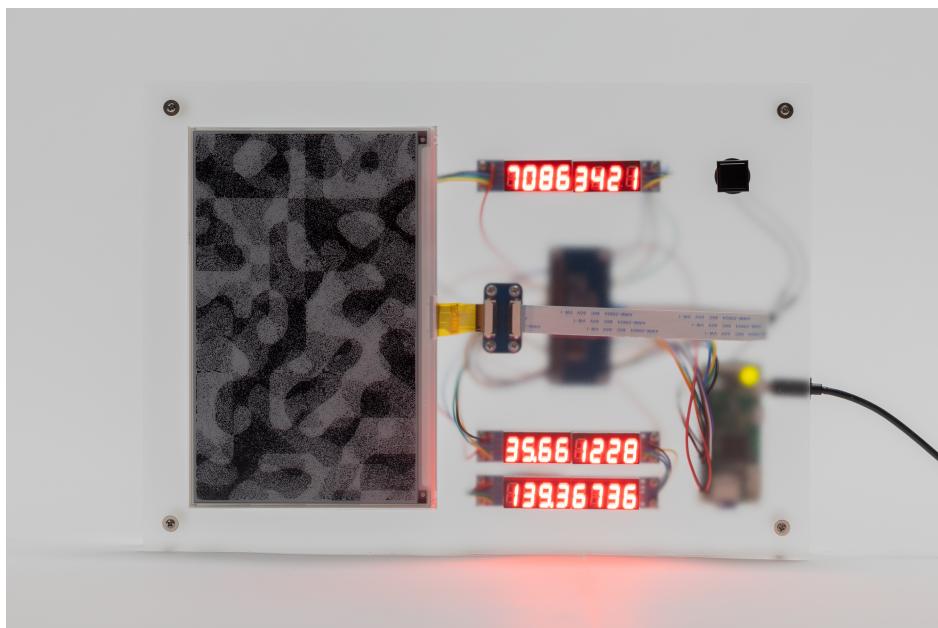


図 1：制作した装置

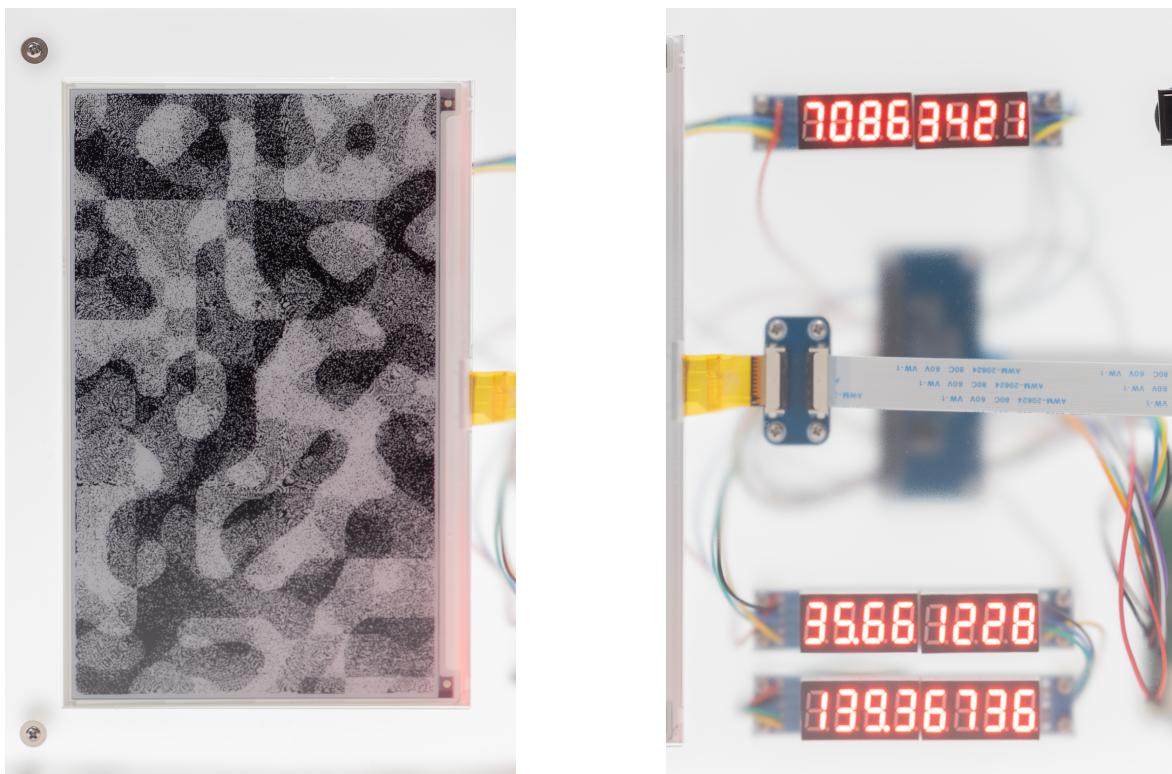


図 2: 各コンポーネントの詳細

5.2 作品の提示手法について

最終的なアウトプットとして、展示空間における生成プロセスの体験と、生成された作品を紙媒体としてスキャン・保存したアーカイブを提示する。電子ペーパーによるビジュアル生成には一定の時間がかかり、即時的に大量の情報を提示できるデジタル領域に遅延をもたらす一方、紙媒体という物理的に定着するアナログ領域には即時性を与える。このデジタルとアナログの反転的な状況は、デジタル表現の再現性と物質性の関係性を再考する契機となる。

6 結論・考察

本研究では、デジタルデータによるアート作品の複製可能性を主な問題設定とし、生成されるビジュアル表現と生成装置を1つのシステムとして取り扱うことで作品の唯一性と固有性を本質的に内在する作品制作を行った。環境決定的変数を用いたりプロセスを明示するといった手段を取ることで3つの視点に裏打ちされた作品を制作した。

システムとしての装置それ自体を1つの作品とし、携帯性を持たせることで様々な環境で作品生成が実行可能となり、デジタルデータの複製可能性を助長する一要因としてのデジタルデバイスの携帯性を模倣しながらも実態として根本的に異なる表現を持たせることができた。電子ペーパーを単なる出力装置の1種としてではなく出力特性を利用することで、それ自体をシステムのユニークさを表現する一因として利用し、情報表示装置としての利用に止まらない新たな利用方法の一端を提示することができた。また、展示計画においてプリントによるビジュアル表現のスキャン画像の提示という手法においてもアナログとデジタルの情報提示に関わる即時性や一覧性について考察をする余地を提供できた。

本研究はアート作品の生成・提示について論じた。同時に、同一のデジタルデータが複数の端末を横断して提示され、表現が均質化される現代において「デジタル」がとることのできる新たなスタンスの1つを提示した。

参考文献

- [1] W. Benjamin, 複製技術時代の芸術. 晶文社, 1999.
- [2] J. A. Fairfield, 「Tokenized The Law of Non-Fungible Tokens and Unique Digital Property」, 2022 年. [Online]. 入手先: <https://scholarlycommons.law.wlu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1738&context=wlufac>
- [3] Artsper, 「NFT Art from boom to bust — Art Market」. [Online]. 入手先: <https://partners.artspaper.com/blog/nft-art-from-boom-to-bust>
- [4] 美術手帖編集部, 「Jackson Pollock — アーティスト | 美術手帖」. [Online]. 入手先: <https://bijutsutecho.com/artists/230>
- [5] 金子智太郎, 「チャンス・オペレーション — Artwords® | artscape」. [Online]. 入手先: <https://artscape.jp/artword/6308/>
- [6] J. Burnham, 「SYSTEMS ESTHETICS」. [Online]. 入手先: https://monoskop.org/images/0/03/Burnham_Jack_1968_Systems_Esthetics_Artforum.pdf
- [7] MACBA Museum of Contemporary Art of Barcelona, 「Condensation Cube — Work | MACBA Museum of Contemporary Art of Barcelona」. [Online]. 入手先: <https://www.macba.cat/en/obra/r1523-condensation-cube/>
- [8] Business Research Insights, 「E Ink Market Report to 2026-2035」. [Online]. 入手先: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/e-ink-market-124024>
- [9] Raspberry Pi Ltd, 「Raspberry Pi Zero 2 W」. [Online]. 入手先: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>
- [10] Waveshare, 「7.5inch HD e-Paper HAT (B) — Wiki」. [Online]. 入手先: [https://www.waveshare.com/wiki/7.5inch_HD_e-Paper_HAT_\(B\)](https://www.waveshare.com/wiki/7.5inch_HD_e-Paper_HAT_(B))
- [11] Python Software Foundation, 「hashlib — Secure hashes and message digests」. [Online]. 入手先: <https://docs.python.org/3/library/hashlib.html>
- [12] D. Carriere, 「geocoder Documentation」. [Online]. 入手先: <https://geocoder.readthedocs.io/>
- [13] H. Elias, 「Perlin Noise」. [Online]. 入手先: https://web.archive.org/web/20080724063449/http://freespace.virgin.net/hugo.elias/models/m_perlin.htm