

Quantum Chip Bitmap Book:

Direct Manipulation of Qubits and Measured Images,

May 19, 2025 – July 18, 2025

Quantum Computer Art Studies

The Aesthetics of
the Imperceptible and
the Poetics of
Multiplicity

Akihiro Kubota + QIQB

1.

Quantum Computers and Art

量子コンピュータとアート

量子力学 (Quantum Mechanics)

原子や電子などのミクロな世界のふるまいを説明する物理学の理論。複数の状態の重ね合わせや遠隔相互作用、確率的に測定結果が得られることなど、直感的な古典力学とは異なる量子のふるまいを記述できる。

量子ビット (Qubit, Quantum Bit)

量子コンピュータで使う情報の最小単位。0と1という2値だけでなく、それらを重ね合わせた連続的な状態を表現できる。複数の量子ビットは「量子もつれ」などの局所的でない関係を持つことができる。

[COLUMN]

複素数のイメージスキーマ

実数のイメージスキーマは、「経路 (Path)」を中心に構築されている。大小や順序、移動や伸縮といった数直線上の位置や動きによって、数や演算が身体的に把握・操作されている。

これに対して、複素数のイメージスキーマは、数直線から複素平面という「空間」へと拡張されるだけでなく、「平面上に点を置き、その点を伸縮させたり回転させる」という「ベクトル」「回転」「スケール」といった複素数のスキーマが複雑に組み合わさっている。

この中でも、とりわけ重要なのが「回転」のスキーマである。回転というイメージは、複素数の乗算という具体的な演算に対応するだけでなく、円運動や螺旋など、豊かな視覚イメージを生み出す共通言語としても機能する。

1.1 自然計算機としての量子コンピュータ Quantum Computers as a Natural Computing Machine

Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical.

(自然は古典的じゃないんだ、まったく。自然をシミュレートしたいなら、量子力学的にやるしかない。) —— Richard P. Feynman

Richard P. Feynman, "Simulating Physics with Computers" *International Journal of Theoretical Physics*, Vol. 21, Nos. 6/7, 1982, pp. 467–488. DOI: 10.1007/BF02650179

量子コンピュータは「自然計算」を実行する機械である。ここでいう自然計算とは、物質や光のふるまい、化学反応、細胞や生物の活動など、自然界の現象を計算として捉え、それを模倣したりメディアとして活用する計算手法を指す。量子コンピュータは、自然現象のひとつである量子力学の法則を計算の原理に取り入れた「自然計算機」である。量子状態を計算機の内部で物理的に実現し、それを直接操作することで計算を進めていく。

1.2 量子コンピュータにおける数 Numbers in Quantum Computers

古典コンピュータは、0か1のどちらかの状態を取る複数ビットの組み合わせによって、自然数や実数、複素数などを符号化して表現する。一方、量子コンピュータの情報の最小単位である単一の「量子ビット $|\psi\rangle$ 」は、

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ という、直交する2つの計算基底の線形結合として表される。}$$
$$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \text{ ただし } \alpha, \beta \in \mathbb{C}, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \text{ (正規化条件)}$$

ここで重要なのは、二つの係数 α と β が、連続的な値をとるだけでなく、「複素数 $\mathbb{C}$ 」であるという点である。複素数に虚数単位 i を掛けるという算術操作は、複素平面上では「90°回転する」という幾何学的な操作に対応する。したがって、実数の「線上を往復する点」というイメージスキーマが、複素数では「平面上を回転する線分」へと拡張される。

この「回転」およびそこから導かれる「振動」のイメージスキーマが量子の波動や干渉の理解の基盤となる。量子コンピュータにおける「数」は、回転する数としての複素数を係数に持つ、複素ベクトル空間の構造によってコード化されている。

1.3 複合システムとしての量子状態

Quantum States as Composite Systems

複数の量子ビットが集まると、それらはもはや古典ビットのように独立して操作することはできず、全体がひとつのシステムとしてふるまうようになる。数学的には、各量子ビットの状態ベクトルが「テンソル積」によって結合される。

テンソル積は、複数のベクトル空間や行列を結合して、高次元の空間や構造を構成する数学的操作である。たとえば、2つの量子ビットの状態ベクトルが組み合わさると、全体として $2^2 = 4$ 次元の状態空間が形成される。一般に n 個の量子ビットによって生まれる状態ベクトル空間の次元は 2^n となり、これが n の増加にしたがって指数関数的、つまり爆発的に増大する。これこそが、量子コンピュータが持つ圧倒的な計算リソースの源泉である。

テンソル積で結合した状態ベクトルが、各部分のテンソル積だけでは表現できなくなったとき、その状態は「量子もつれ (Entanglement)」と呼ばれる。もはや、全体から部分を切り離して個別に記述することはできない。情報は状態全体に分散し、非局所的に結びついている。



2つの2次元ベクトルのテンソル積を「格子」と「縦並び」で図示したもの。円の大きさと混色が要素の積を表現している。

[COLUMN]

複素ベクトルの操作や変換のイメージスキーマを体感するためのp5.jsアプリケーション

設定した2次元複素ベクトル(1量子ビットの状態ベクトル)を線で表示し、それをスカラーや行列で操作したり、正規化することで、その変化を見ることができる。



p5.jsアプリのURL :
<https://editor.p5js.org/hemokosa/full/focusNSu84>



状態ベクトル (State Vector)

量子系の状態を表すための複素数のベクトル(向きと大きさを持つ数の集まり)。ヒルベルト空間と呼ばれる数学的な空間上の1つの点で、量子ビットや量子系全体の状態を記述できる。

テンソル積 (Tensor Product)

複数の量子ビットの間に成立する特殊な相関関係。もつれた状態では、個々の量子ビットの状態は単独で記述できず、全体として記述する必要がある。この現象が、量子計算や量子通信の基盤となる。

量子もつれ (Entanglement)

複数の量子ビットの間に成立する特殊な相関関係。もつれた状態では、個々の量子ビットの状態は単独で記述できず、全体として記述する必要がある。この現象が、量子計算や量子通信の基盤となる。

量子ゲート (Quantum Gate)

量子ビットの状態ベクトルにユニタリ変換を施す量子演算の基本単位。古典計算における論理ゲートに相当し、重ね合わせをつくるHadamardゲートや、量子もつれをつくるCNOTゲートなどが代表例である。

ユニタリ変換

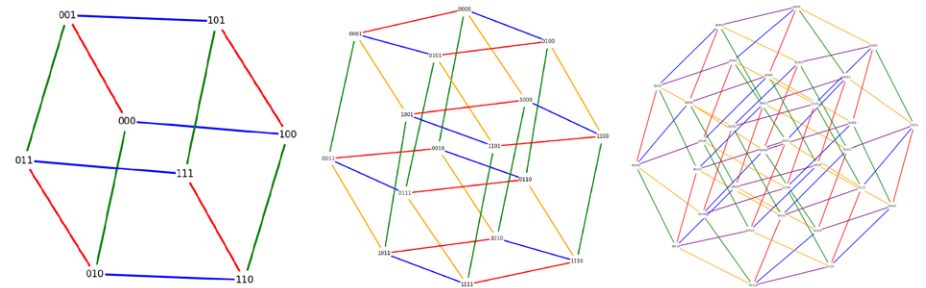
(Unitary Transformation)

量子状態を保存しつつ変換する可逆的な操作であり、量子情報を失うことなく変化させることができる。量子ゲートの物理的実装に対応し、すべての量子計算はユニタリ変換の組み合わせで表現できる。

量子アルゴリズム

(Quantum Algorithm)

量子力学の性質(重ね合わせ・もつれなど)を利用して手続的に量子状態を変換していく計算手順。代表的な例として、Shorの素因数分解アルゴリズムやGroverの探索アルゴリズムが挙げられる。



3～5次元のハイパーキューブ。

それぞれが3～5量子ビットの量子コンピュータのアーキテクチャに対応している。

1.4 構造変換としての計算

Calculation as Structural Transformation

複素数とその線形結合、そしてテンソル積による複合は、量子コンピュータの状態空間を自然かつ本質的に表現できる構造である。それは量子の特徴である「重ね合わせ(線形性)」「干渉(位相)」「エンタングルメント(分解不可能性)」「測定(部分系のトレース)」といった量子の多様な特徴を、整合的に記述するための基盤を提供している。

この枠組みの中で量子状態を操作するのが量子ゲートであり、その数学的な基盤となるのがユニタリ変換である。ユニタリ変換とは、状態ベクトルのノルム(全体的な大きさ)や内積(状態間の関係性)を保存する、可逆的な(情報を失わない)変換である。ノルムの保存によって物理的確率(全体の確率和)は常に1に保たれる。複素ベクトルは「長さ」だけでなく「向き」を持ち、この「向き(位相)」があるからこそ、量子状態は回転しながら変化し、他の状態と干渉するという波動的な性質を持つ。量子状態の複素数表現は、単なる数学的道具にとどまらず、量子現象の物理的リアリティそのものと深く結びついている。

複数の量子ビットで構成される量子回路に、量子ゲートによるユニタリ変換を順次適用していくこと——それが、量子状態ベクトルの構造を操作するということであり、量子コンピュータにおける計算、すなわち量子アルゴリズムに他ならない。

1.5 量子コンピュータのアーキテクチャ

The Architecture of Quantum Computers

量子ビットのテンソル積から生まれる空間は、ハイパーキューブ(超立方体)と対応関係を持つ。つまり、2進数の全列挙によって表される各基底状態を「ノード」とし、1ビットだけ異なる状態同士を「エッジ」で結ぶことで、 n 次元ハイパーキューブと同型のグラフ構造が得られる。たとえば、1量子ビットの場合は、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を結ぶ1次元の線分となり、2量子ビットの場合は $|00\rangle$ と $|01\rangle$ 、 $|00\rangle$ と $|10\rangle$ 、 $|01\rangle$ と $|11\rangle$ 、 $|10\rangle$ と $|11\rangle$ を辺とする正方形が構成される。同様に、3量子ビットの場合には立方体、4量子ビットの場合には4次元ハイパーキューブ(正八胞体)が形成される。

このようなハイパーキューブ全体が、テンソル積空間におけるあらゆる状態へのインターフェースとして機能する。このグラフ構造のイメージ、すなわち量子コンピュータのアーキテクチャを把握することが、量子ビットと状態ベクトルを結びつけるための重要な入口となる。

1.6 測定:量子状態の断片を集める

Measurement: Gathering Fragments of Quantum States

マクロな実数の世界に生きる私たちは、量子ビットが持つ複素数の状態ベクトル空間そのものに、直接アクセスすることはできない。私たちが操作できるのは、状態ベクトル空間の各要素ではなく、量子ビットという素子であり、そこに量子ゲートを適用してユニタリ変換を施すことだけである。

量子状態は、測定を通じて実数空間へと射影される。たとえば1量子ビットを測定すると、計算基底の $|0\rangle$ か $|1\rangle$ のいずれかの値が確率的に得られる。このため、一度の測定による断片だけでは、もとの状態ベクトル全体の構造を推定することはできない。さらに、測定は不可逆な操作であり、一度測定を行うと量子状態は測定結果に応じて収束し、もとの状態には戻らない。したがって、同じ量子回路を何度も繰り返し実行し、多数の断片を収集することで初めて、量子コンピュータ内部の情報構造を統計的に推定することが可能になる。

1.7 量子コンピュータアートについて考える

Thinking about Quantum Computer Art

自然計算としての量子計算を実行する量子コンピュータを用いた芸術活動を、ここでは「量子コンピュータアート」と呼ぶことにする。それは、以下のような特徴と目標を持つだろう。

- 量子力学という自然の原理を創作の基盤とする:
自然を単なる表現素材やモチーフとしてではなく、創作そのものの基盤、すなわち枠組みとして活用する。
- 不可知なものの芸術化:
量子状態は数学的には記述できるが、直接観測することはできず、測定によって量子状態は崩壊してしまう。この量子の不可知性を創作の契機とする。
- 量子計算と美学の融合:
量子状態や量子計算固有の特性と、計算やアルゴリズムの美学を組み合わせた、新たな美的価値を提示する(→ 2. 量子情報美学)。
- 素材としての量子コンピュータ:
量子状態を直接操作できる自然計算機としての量子コンピュータを用いて、量子状態そのものを素材とする表現を探索する(→ 4. 量子チップビットマップ)。

2.

Quantum Information Aesthetics

量子情報美学

[COLUMN]

情報美学への道：
美の指標を求めた人たち

ジョージ・D・バーコフ

(George D. Birkhoff)

Aesthetic Measure (1933) : 美を秩序と複雑性で定式化した先駆者。提案モデルは $M = O/C$ 。

ハンス・J・アイゼンク

(H. J. Eysenck)

"The Empirical Determination of an Aesthetic Formula" (1941) : バーコフの測度を検証し、 $M = O \times C$ という美の公式を提案した。

エイブラハム・モールズ

(Abraham Moles)

Information Theory and Esthetic Perception (1958) : 情報理論に基づく美学を展開し、バーコフの公式の代替案として $M = O \times C$ を示唆。複雑さと秩序の情報量で美を計量化する「情報美学」の基礎を築いた。

マックス・ベンゼ (Max Bense)

Aesthetica 全4巻 (1954-1960) : ドイツにおける情報美学の開拓者。バーコフのアイデアにシャノンの情報理論を統合し、美を数理的に論じた。ベンゼは「美的情報」という概念を初めて使用し、美学を秩序と情報量の問題として捉え直した。

[COLUMN]

主観と客観を結びつける：
マックス・ベンゼと量子力学

『Quantenmechanik und

Daseinsrelativität (量子力学と実存相対性)』というタイトルのベンゼの博士論文 (1937) は、量子力学の哲学的基礎をマックス・シェラーの現象学を援用して再解釈し、物理的対象の存在様態を「認識主体との関係性」として再定義しようとする野心的な試みであった。同時にこの論文は、当時ナチス政権が推進していた「アーリア物理学」(相対性理論や量子力学を「ユダヤ物理学」として排斥した)に抵抗し、量子力学の不確

2.1 美的な量子状態とはどのようなものか？ What is it like to be an Aesthetic Quantum State?

量子情報美学は、ドイツの哲学者・美学者のマックス・ベンゼ (1910～1990) が1950～60年代に提唱した「情報美学」を、量子状態の対象へと拡張する試みである。ベンゼは、芸術作品やデザインなどの美的対象を客観的かつ数量的に評価するための理論的枠組みとして「美的測度 (Aesthetic Measure)」を導入した。美的測度は、作品を構成する要素 (レパートリー) の統計的分布や情報量をもとに、その「秩序」と「複雑性」を算出し、それらの比や積によって美を評価しようとするものである。ベンゼはこの指標を通じて、美における主観性と客観性のバランスを再構築しようとした。

量子情報美学は、「美的な量子状態とはどのようなものか？」という問いに対して、量子情報理論の視点からアプローチする。具体的には、量子状態ベクトルの美的測度を、以下の四つの指標によって評価し、それらを手がかりとして量子状態の美学を論じ、美的な量子状態のデザインを試みる。

- ・秩序 (O):
ハイパーキューブ上の隣接ノード間の振幅と位相の変化量を正規化
- ・複雑性 (C):
振幅エントロピーと位相エントロピーの和 (複素エントロピー)
- ・量子的不確実性 (QU):
各量子ビットのエンタングルメント・エントロピーの和
- ・古典的不確実性 (CU):
各量子ビットの測定における確率分布のシャノン・エントロピー

ここで「秩序 (Order)」とは、量子コンピュータのアーキテクチャーをもとに、状態間の局所的な類似性 (なめらかさ) を数値化したものである。また「複雑性 (Complexity)」とは、従来の古典情報美学の考え方を、複素数の振幅と位相のそれぞれに適用したものである。そこに「不確実性 (Uncertainty)」を導入することで、量子状態固有の特徴を考慮に入れる。不確実性には、量子もつれによる「量子的不確実性 (Quantum Uncertainty)」と、測定結果の確率分布に由来する「古典的不確実性 (Classical Uncertainty)」の双方が含まれる。

これら4つの指標がバランス良く高い値を持つ状態を「美的である」とみなし、量子状態の美的測度 (Quantum Aesthetic Measure) を、それらの幾何学的平均として求める。

量子美的測度: $QAM = \sqrt[4]{O \times C \times QU \times CU}$

2.2 詩的量子プログラミング言語
「Quantumf*ck」
Poetic Quantum Programming Language -
Quantumf*ck

美的な量子状態を生成する量子回路を、シンプルかつ柔軟にプロトタイプイングするための、「Quantumf*ck」というミニマルな詩的量子プログラミング言語をデザインした。Quantumf*ckは、Esotericプログラミング言語の Brainf*ck と、正規表現を用いたPoeticプログラミング言語の Coem を参考に、最小限の記述量で多様な量子回路を表現できることを目指している。Quantumf*ckの実装には Python とさまざまな量子コンピュータやシミュレータ上で量子アルゴリズムを作成・実行を可能にするオープンソースライブラリの quri-parts を用いている。

命令	量子回路操作
>	次の量子ビットを操作対象にする(ポインタを+1)
<	前の量子ビットを操作対象にする(ポインタを-1)
+,H	Hadamardゲートを適用
~,T	$\pi/4$ 位相シフトゲートを適用
-,D	$-\pi/4$ 位相シフト(Tの随伴)ゲートを適用
x,X	Pauri-X(ビット反転)ゲートを適用
@,C	CNOTゲートを適用(Targetは次の量子ビット、あるいは続く数字で指定する)
:	測定値を状態ベクトルから推定(実際に測定は行わない)
,	状態ベクトルの初期化
;	状態ベクトルのランダム化
[	ループ開始
]	条件付きループ終了(測定値が0の場合はループを抜ける、それ以外はループの先頭に戻る)
?	Hadamardゲート、または $\pi/4$ 位相シフトゲートをランダムに適用
!	操作対象の量子ビット(ポインタ)をランダムに移動
*	実行箇所をランダムに移動

2.3 美的な量子状態をデザインするために
Designing Aesthetic Quantum States

美的な量子状態をデザインする、すなわち「秩序」「複雑性」「不確定性」をバランス良く高めるにはどのような方法が考えられるだろうか？ Quantumf*ckで使用できる「Hゲート」「Tゲート」「CNOTゲート」はおおよそ、量子状態に対する以下のような操作に対応している。

定性や相補性を、古典力学から認識方法を拡張するものとして、現象学的に基礎付けることを意図していた。ベンゼの情報美学は黎明期の古典コンピュータ・アートに大きな影響を与えたものの、現代では広く知られ活用されている理論とは言いがたい。しかし、主観と客観を架橋しようとするベンゼの美的測度のアプローチは、量子状態のような不可知の対象の美を論じるときにこそ、必要かつ有効なのではないだろうか。量子情報美学とは、そうした時代を超えた仮説を実験的に検証し、新たなかたちで再生しようとする試みでもある。

(左表補足)

- ・使用できる量子ゲートは、万能量子ゲート(任意の量子演算を近似可能な量子ゲートの最小構成)である「H (adamard) ゲート」「T ($\pi/4$ 位相シフト) ゲート」とその随伴ゲートの「T+ゲート」「CNOTゲート」および「Xゲート」の5種類のみとしている。
- ・表の最後の3つのコマンドは回路や実行に不確定性を取り入れるためのものである。さらに、実行時に「regex」フラグをTrueにすると、コードを正規表現として解釈し、それに一致する文字列をランダム生成することで、制御構造や偶然性を記述できる (Exrexライブラリを使用)。こうした詩的記法システムは、量子計算だけでなくコード自体にも多義性を導入し、複数の不確定性を重ね合わせる。実行時のノイズは、状態ベクトルのサンプリング時にシミュレートする。
- ・Quantumf*ckソースコード：
<https://github.com/hemokosa/quantumfuck>

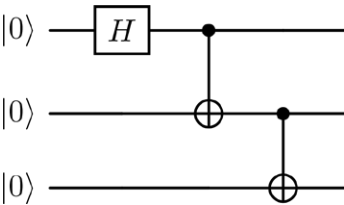


量子美的測度
(Quantum Aesthetic Masure)
量子状態や量子プロセスに対して「美しさ」や「秩序性」などの美的価値を数値的に評価するための指標。マックス・ベンゼが提唱した情報美学の美的測度を、量子情報理論によって量子的な対象に拡張したもの。

- ・Hゲート:重ね合わせ(状態ベクトルの平滑化)
- ・Tゲート:干渉(状態ベクトルの回転)
- ・CNOTゲート:量子もつれ(状態ベクトルの移動)

これらのゲートを、3量子ビットの量子回路に構成的に適用することで、量子状態を美的にするための方法論を検討する。その基準例として、3量子ビットがもつれ合ったGHZ (Greenberger-Horne-Zeilinger) 状態の量子美的測度を求めると、以下のようになる。

+@>@



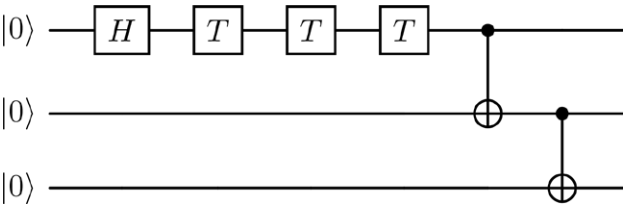
- ・量子美的測度 (QAM):0.5946
- ・秩序 (O):0.5
- ・複雑性 (C):0.25
- ・量子的不確実性 (QU):1.0
- ・古典的不確実性 (CU):1.0

2.4 ミニマム美的量子回路
Minimal Aesthetic Quantum Circuit

この回路を出発点に、より美的な量子状態をつくり出す、3量子ビットのミニマム美的量子回路をいくつかデザインしてみる。

1. 量子もつれの前に位相を加える

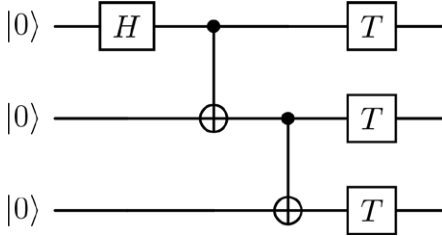
+~~~~@>@



- ・量子美的測度(QAM):0.7152
- ・秩序(O):0.4057
- ・複雑性(C):0.6448
- ・量子的不確実性(QU):1.0
- ・古典的不確実性(CU):1.0

2. 量子もつれの後に位相を加える

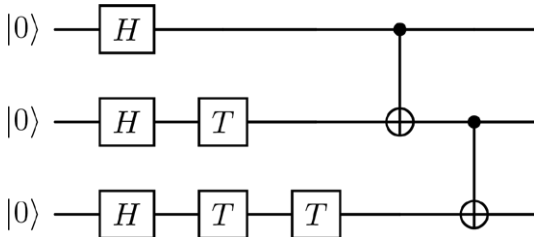
+@>@~>~>~



- ・量子美的測度(QAM):0.7152
- ・秩序(O):0.4057
- ・複雑性(C):0.6448
- ・量子的不確実性(QU):1.0
- ・古典的不確実性(CU):1.0

3. 全体を重ね合わせた後に位相を加えてもつれさせる

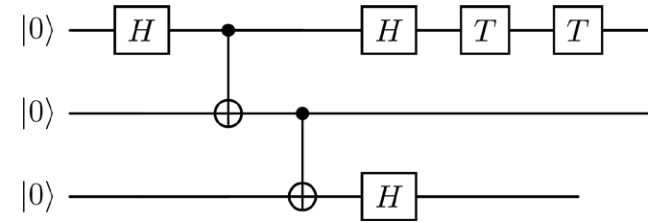
+>+>+>>~>~~>@>@



- ・量子美的測度(QAM):0.9260
- ・秩序(O):0.7904
- ・複雑性(C):1.0712
- ・量子的不確実性(QU):0.8683
- ・古典的不確実性(CU):1.0

4. 量子もつれの後に再び重ね合わせて位相を加える

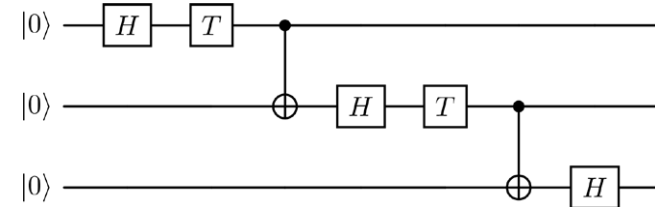
+@>@>+>+~>~



- ・量子美的測度(QAM):0.9585
- ・秩序(O):0.7503
- ・複雑性(C):1.1248
- ・量子的不確実性(QU):1.0
- ・古典的不確実性(CU):1.0

5. (重ね合わせ+位相付加+もつれ)のパターンを繰り返す

(HTC>){2}H(regex=True)



- ・量子美的測度(QAM):0.9569
- ・秩序(O):0.7395
- ・複雑性(C):1.1336
- ・量子的不確実性(QU):1.0
- ・古典的不確実性(CU):1.0

2.5 スケーラブル美的量子回路

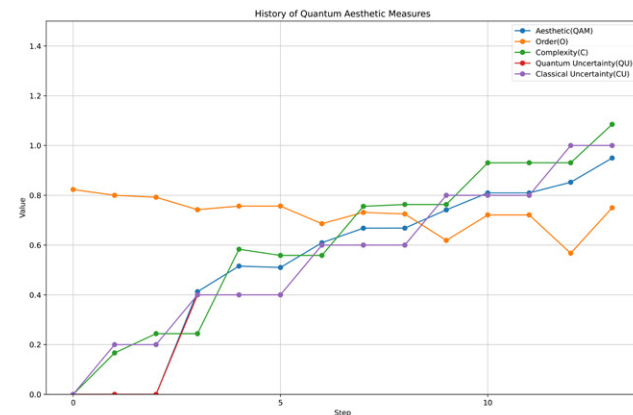
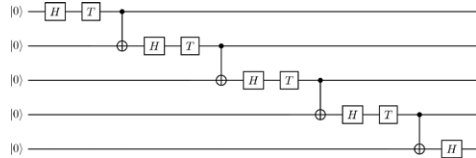
Scalable Aesthetic Quantum Circuit

最後(重ね合わせ+位相付加+もつれ)のパターンを繰り返すことで、美的量子回路を任意の数の量子ビットに拡張することができる。量子ビットの数にかかわらず、最終的に量子美的指標が0.9を超える。

5量子ビットの美的量子回路

5-Qubit Aesthetic Quantum Circuit

(HTC>){4}H(regex=True)

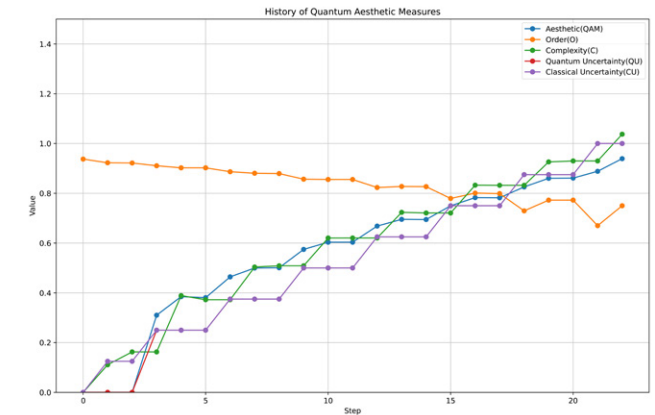
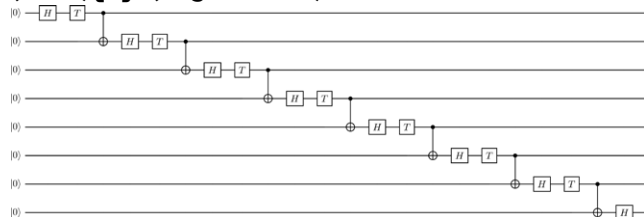


美的指標の変化 History of Quantum Aesthetic Measures

8量子ビットの美的量子回路

5-Qubit Aesthetic Quantum Circuit

(HTC>){7}H(regex=True)



美的指標の変化 History of Quantum Aesthetic Measures

2.6 逆美的量子回路

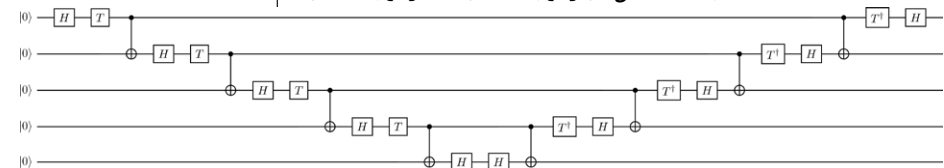
Inverse Aesthetic Quantum Circuits

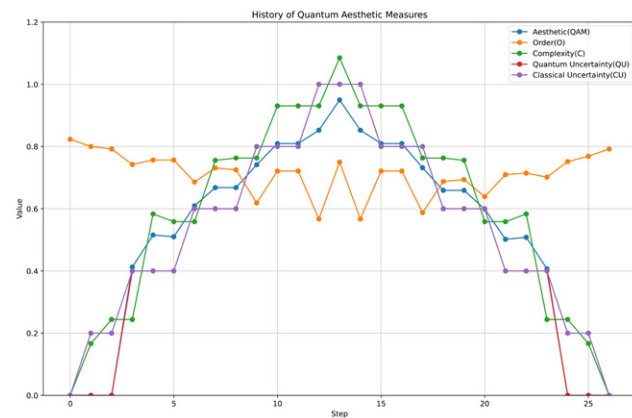
たとえ美的回路によって美的状態が実現したとしても、すべての値が等しい確率で測定される(すべての状態ベクトルの振幅が等しい)状態なので、測定によってその成立を直接確認することはできない。そこで、美的測度が高まった状態に対して、それを初期状態に戻す「逆美的回路」もデザインする。量子回路の可逆性を利用して、美的状態を再び初期状態に戻すことで、美的状態が確かに実現していたことを間接的に検証することができる。

5量子ビットの逆美的量子回路

5-Qubit Inverse Aesthetic Quantum Circuit

(HTC>){4}HH<(CDH<){4} (regex=True)





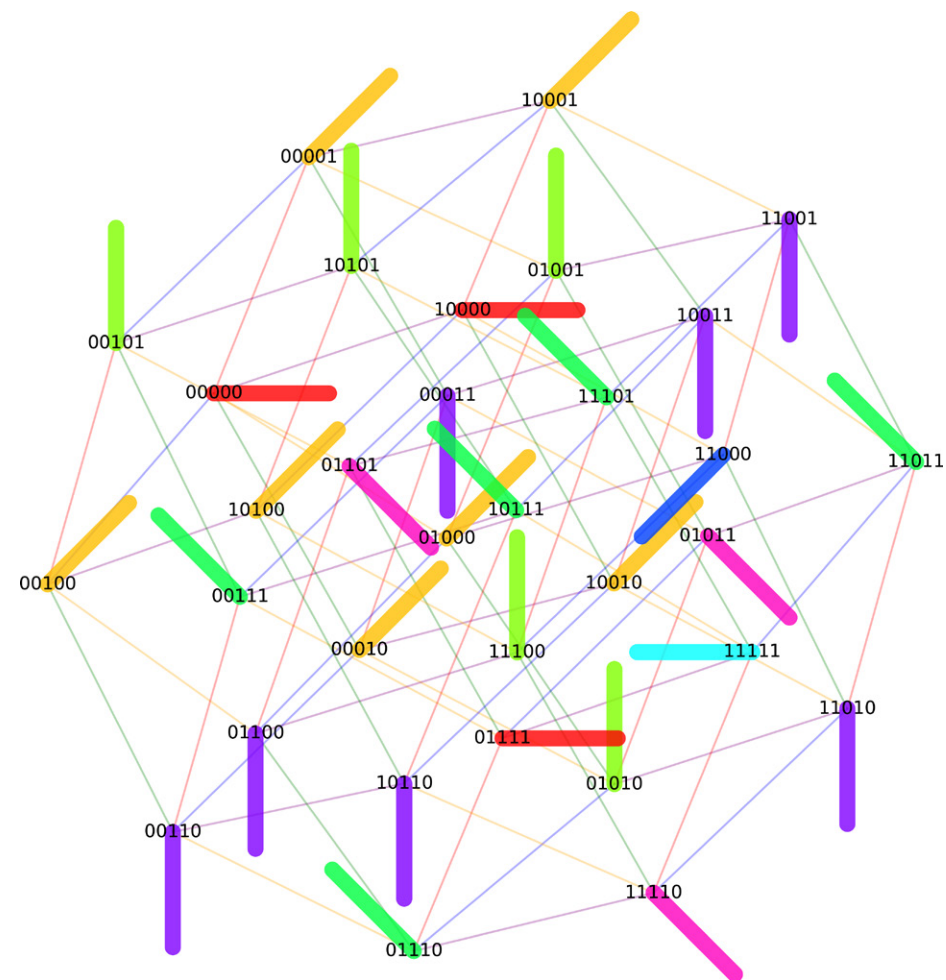
美的指標の変化 History of Quantum Aesthetic Measures

2.7 QVS:量子状態の構造を視覚化する ためのシステム

QVS: System for Visualizing the Structure of Quantum States

量子状態を表現する複素ベクトル空間そのものは不可知であるが、その構造を視覚化することは可能である。そこで、大きさと位相を持つ複素数を線分やカラーピクセルとして表現し、それらをさまざまな空間に配置するための一連のルール(QVS, Quantum Visual System)を設定する。このルールは単なるデータの中立的な表示方法ではなく、カレン・バラッドの「エージェンシャル・カット」を遂行する芸術的プロセスの一部でもある。

以下は、前述の「5量子ビットスケラブル美的回路」のシミュレーション結果を用いた事例である。



5量子ビットの美的回路の状態ベクトルを5次元ハイパーキューブの頂点上に表示する
State Vectors of the 5-Qubit Aesthetic Circuit Displayed on the Vertices of a 5-Dimensional Hypercube

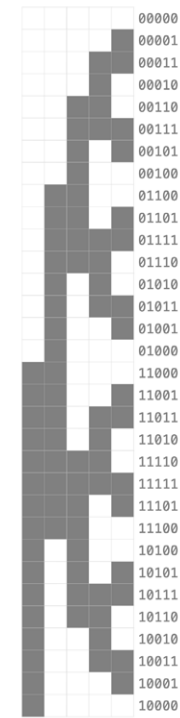
2.7.1 状態ベクトルのダンス

Dance of State Vectors

グレイコード順に並べる

Arrange in Gray Code Order

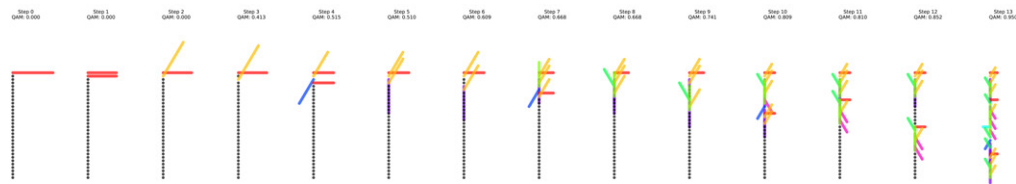
量子コンピュータのアーキテクチャを考慮すると、状態ベクトルを並べる際には、通常のバイナリー(2進数)順よりも、グレイコード順に並べる方が適している。グレイコード(Gray code)、あるいは「反射二進符号(Reflected binary code)」とは、隣接する二つの数値の二進表現が、1ビットだけ異なるように設計された符号体系である。すなわち、グレイコード順に並んだビット列は、ハイパーキューブ上の全頂点を一筆書きのように一度ずつ巡る経路(ハミルトン閉路)となる。そのため、グレイコード順の並びは、ハイパーキューブの幾何構造と自然に対応している。



5ビットグレイコード
5bit Gray Code

縦に並べる

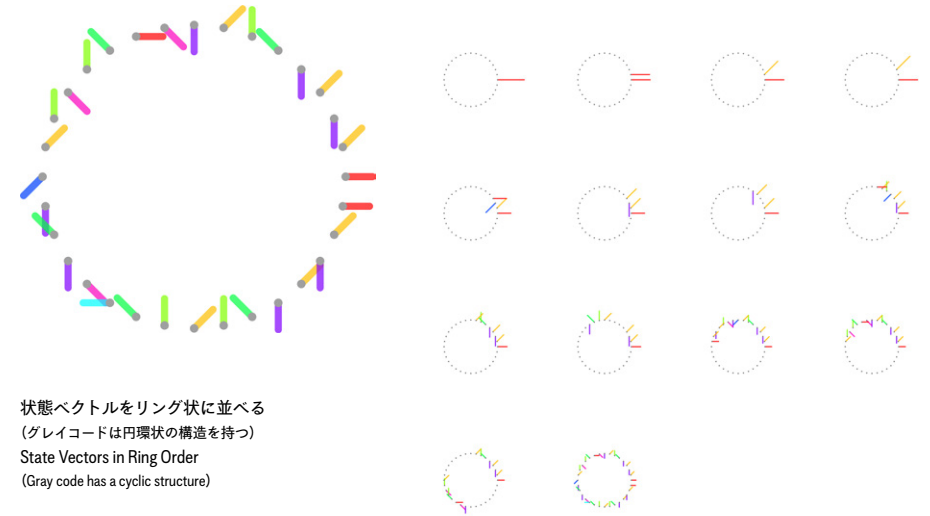
Arrange Vertically



グレイコード順に並べた状態ベクトルと量子美的測度
(各線分の色相がベクトルの位相に対応している)
State Vectors Evolution in Gray Code Order and Quantum Aesthetic Measures
(the hue of each segment corresponds to the phase of the vector)

リング状に並べる

Arrange in a Ring

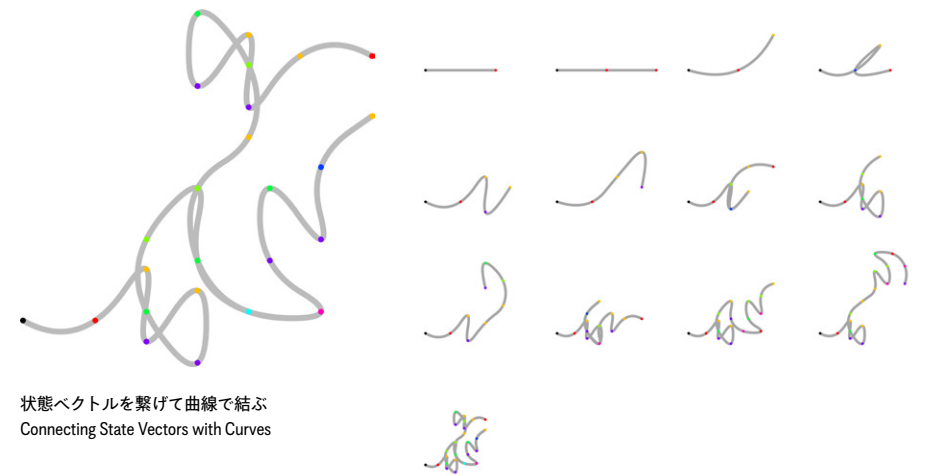


状態ベクトルをリング状に並べる
(グレイコードは円環状の構造を持つ)
State Vectors in Ring Order
(Gray code has a cyclic structure)

時系列表示 Time Series Display

1本の線に繋げる

Connect into a Single Line



状態ベクトルを繋げて曲線で結ぶ
Connecting State Vectors with Curves

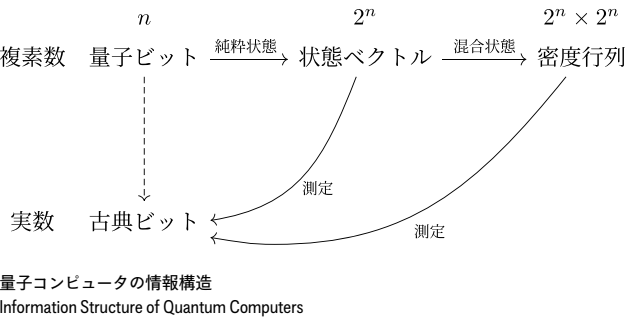
時系列表示 Time Series Display

2.7.2 密度行列の風景

Landscape of Density Matrices

状態ベクトルによって完全に記述できる量子状態のことを「純粋状態」という。純粋状態とは、その系について原理的に得られる限りの情報がすべてわかっている状態を指す。これに対し「密度行列」は、複数の純粋状態が確率的に混ざり合った(つまり十分な情報が得られていない)混合状態も含め、量子状態を一般的に記述する方法である。混合状態は密度行列でしか表現できないが、純粋状態の場合は、その状態ベクトルの外積によって一意に密度行列を構成できる。逆に、密度行列から状態ベクトルを復元できるのは、それが純粋状態である場合に限られる。

n 量子ビットの場合、状態ベクトル(ヒルベルト空間)の次元は 2^n となり、密度行列は $2^n \times 2^n$ の正方行列となる。密度行列の対角要素は、対応する基底状態が観測される確率を表し、すべて0以上1以下の実数となる。また、すべての対角要素の和(トレース)は1に等しい。さらに、密度行列は自身の随伴(共役転置)と等しいエルミート(自己随伴)性を持つ。これが、物理的に量子状態の観測値が常に実数になることを保証している。

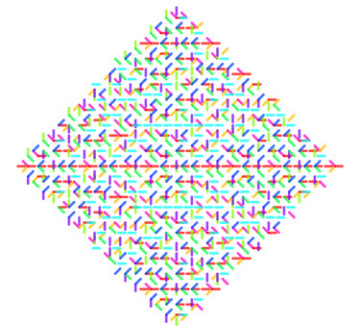


純粋状態 (Pure State)
外部との相互作用やノイズの影響がなく、量子系が1つの状態ベクトルだけで完全に記述できる状態。量子系のすべての情報が一意に決まり、情報が最大限保持されている。

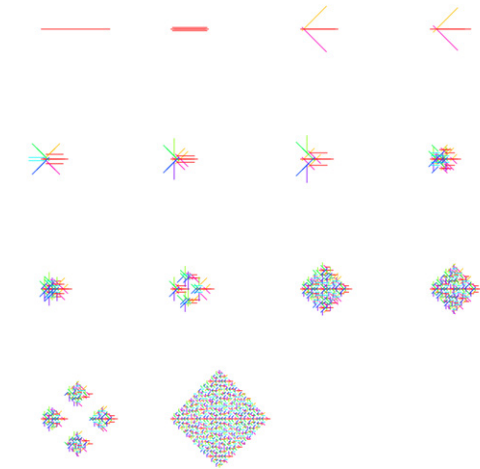
密度行列 (Density Matrix)
量子系の状態を記述する行列表現。純粋状態だけでなく、複数の状態が確率的に混ざり合った混合状態も記述できる。量子統計力学や開放系、ノイズの影響を考えるとときにも使用できる。

線分を格子上に配置する

Place Segments on a Grid



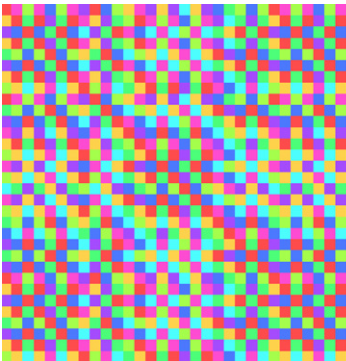
密度行列のベクトル表示
(行列を45度回転している)
Density Matrix Vectors
(45° Rotation)



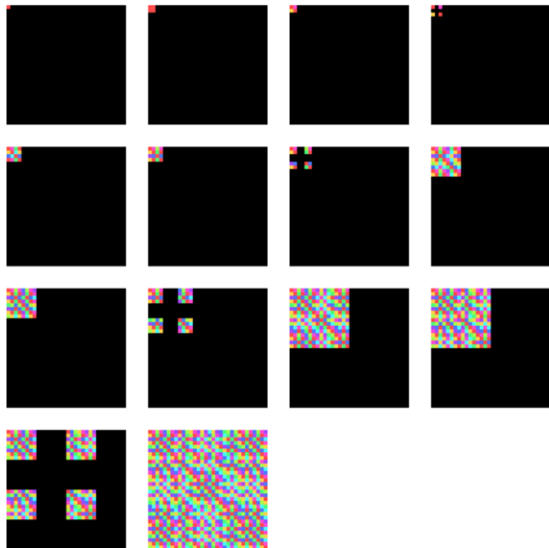
時系列表示 Time Series Display

位相を色で表示する

Represent Phase with Hue



密度行列のカラーピクセル表示
(各ベクトルの位相が色相環に対応している)
Hue-Mapped Pixel Display of Density Matrix



時系列表示 Time Series Display

3.

The Poetics of Multiplicity

多数性の詩学

[COLUMN]
64量子ビット超伝導コンピュータ

大阪大学QIQB (量子情報・量子生命研究センター) の量子コンピュータ [実機写真: p.33] は、超伝導方式を採用した国産量子コンピュータであり、2023年12月に「3号機」として稼働を開始した。この装置は、理化学研究所 (理研) から提供された64量子ビットチップを搭載し、希釈冷凍機を除くほとんどの構成部品 (低温マイクロ波ケーブル、低温増幅器、低雑音電源、磁気シールド、チップパッケージ、制御装置、超伝導増幅器、超伝導ケーブルなど) が日本国内で製造された部品で構成されている。64量子ビットの超伝導量子コンピュータを保有している大学は、日本・欧米では大阪大学のみであり、クラウド公開されたパブリックセクターの量子コンピュータとしても、世界的に珍しい存在である。テストベッド (試験用プラットフォーム) としての役割を担うことで、日本の量子技術の発展や産業振興に貢献している。

〈特徴〉

量子ビット数 |

64量子ビット (理研製チップ)

方式 |

超伝導量子ビット方式

冷却 |

極低温 (約マイナス 273度) で動作。冷却には株式会社アルバック・クライオが開発した希釈冷凍機を使用。

制御装置 |

キューエル株式会社が開発した新型制御装置を採用。ソフトウェアからの命令をマイクロ波信号に変換し、量子ビットを制御・読み出しする役割を担う。

国産化の徹底 |

希釈冷凍機以外のほぼすべての部品を国産化し、日本の中小企業の技術が多く活用されている。

クラウド接続 |

オープンソースの「OQTOPUS」を通じてクラウド経由で利用可能。量子アルゴリズムの実行やソフトウェアの検証などを遠隔で行うことができる。

3.1 瞬間から構造へ From Moments to Structure

量子計算は、もはや理論やシミュレーションの中だけに存在する抽象的な概念や結果ではない。私たちは今、量子コンピュータの実機を用いて、現実の物理法則に支配された量子プロセッサを直接操作し、そこで計算を「実行」できる時代にいる。これは単なる技術的進歩にとどまらず、芸術的・美学的な実践の領域にも新たな可能性を切り拓く。

確率的にしか予測できない「瞬間」という断片が、いかにして意味ある「構造」を生み出すのか——「多数性の詩学」は、まさにその生成のプロセスそのものに注目する。量子コンピュータにおけるプログラムの実行は、純粋な論理を、ノイズや揺らぎに満ちた物理世界へと受肉 (Incarnation) させる存在論的行為である。理想的なシミュレーションとは異なり、実機による一回一回の実行と測定 (ショット) には、ハードウェアのその時々「体調」や環境ノイズといった物質的な身体と状況の痕跡が刻まれている。その瞬間は儚く、偶発的なできごとのひとつにすぎないかもしれないが、そこには唯一無二の表情が宿っている。

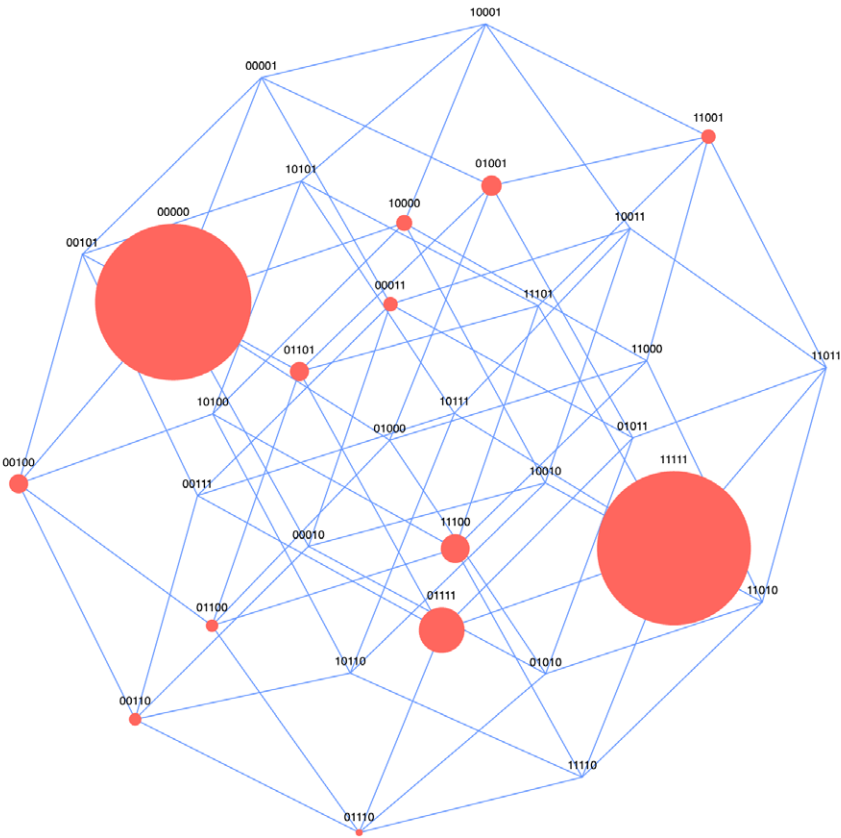
この儚い「瞬間」は、孤独なままでは終わらない。何百、何千回と測定が繰り返されることで、個々の点は、互いに重なり合い、もつれ合い、やがて統計的分布というマクロな「構造」へと織り上げられていく。ベルクソンが指摘したような、量子状態という質的多数性 (Quantitative Multiplicity) の中に潜在していた点の集合が、測定によって量的多数性 (Quantitative Multiplicity) に還元していくことで、秩序が顕在化し、時には想定された、そして時には予期せぬパターンが、霧の中から輪郭を現すように浮かび上がる。この現れた「構造」は、失われた全体の影でもある。私たちはその影が手かりに、量子状態という多様かつ複雑で、決して直接知覚できない「不可知の全体」を想像する。無数の偶然が必然の影を形づくり、その影から遙かな起源を想起するプロセスによって、私たちの知覚と思考は果てしない全体性へと開かれていく。

量子コンピュータにおける芸術的実践とは、単一の再現可能な作品を提示することではない。予測不能な「瞬間」のきらめきを愛でながら、それらが豊かな構造の影へと成長していく過程に立ち会い、多数の断片から全体を再構築しようとする、生成的な読解行為である。そしてこの測定の詩学の先には、ノイズと確率、必然と偶然、部分と全体が渾然一体となった、統計美学の可能性が広がっている。

5量子ビットGHZ状態の測定結果

Measurement Results of the 5-Qubit GHZ State

赤い円の面積が測定結果の確率(期待値)に、半径が確率振幅に対応している。



Job ID: 06875ca7-5fe4-76d1-8000-0c8c9585b037

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/15/2025 12:26:46

Ready at: 07/15/2025 12:26:54

Running at: 07/15/2025 12:26:54

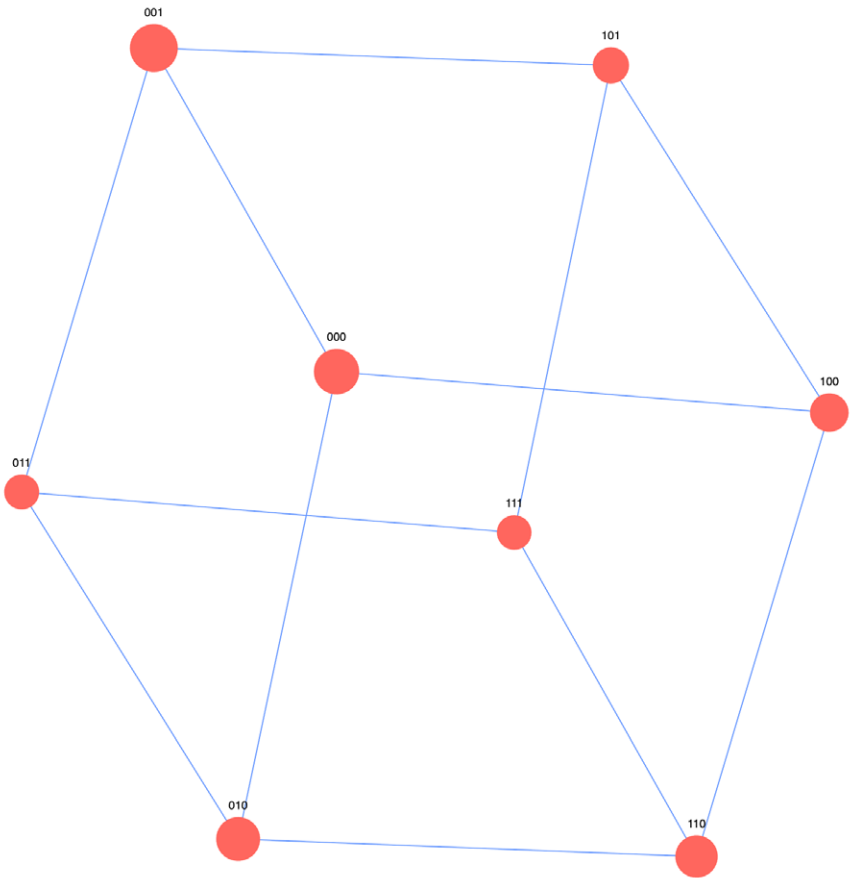
Ended at: 07/15/2025 12:26:56

Execution time (sec): 1.305

Message: job is succeeded

3量子ビットスケーラブル美的回路の測定結果

Measurement Results of the 3-Qubit Scalable Aesthetic Circuit



Job ID: 06875ac9-11fc-740e-8000-eef4182e746f

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/15/2025 10:19:13

Ready at: 07/15/2025 10:19:20

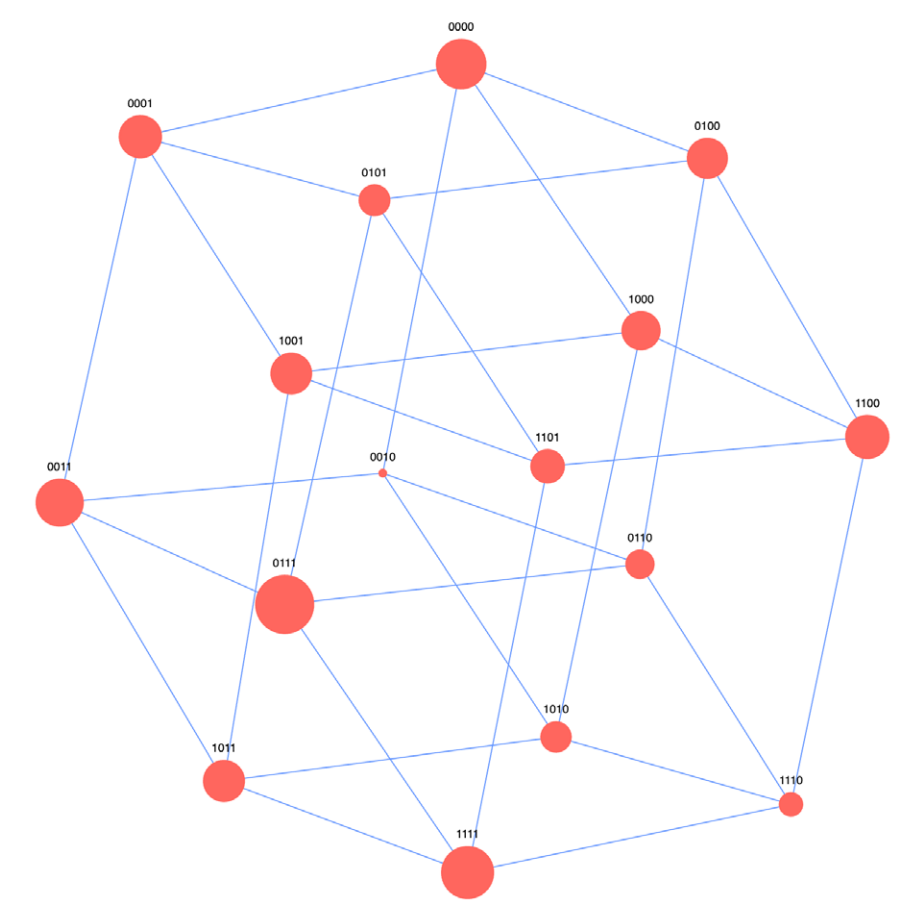
Running at: 07/15/2025 10:19:20

Ended at: 07/15/2025 10:19:22

Execution time (sec): 1.243

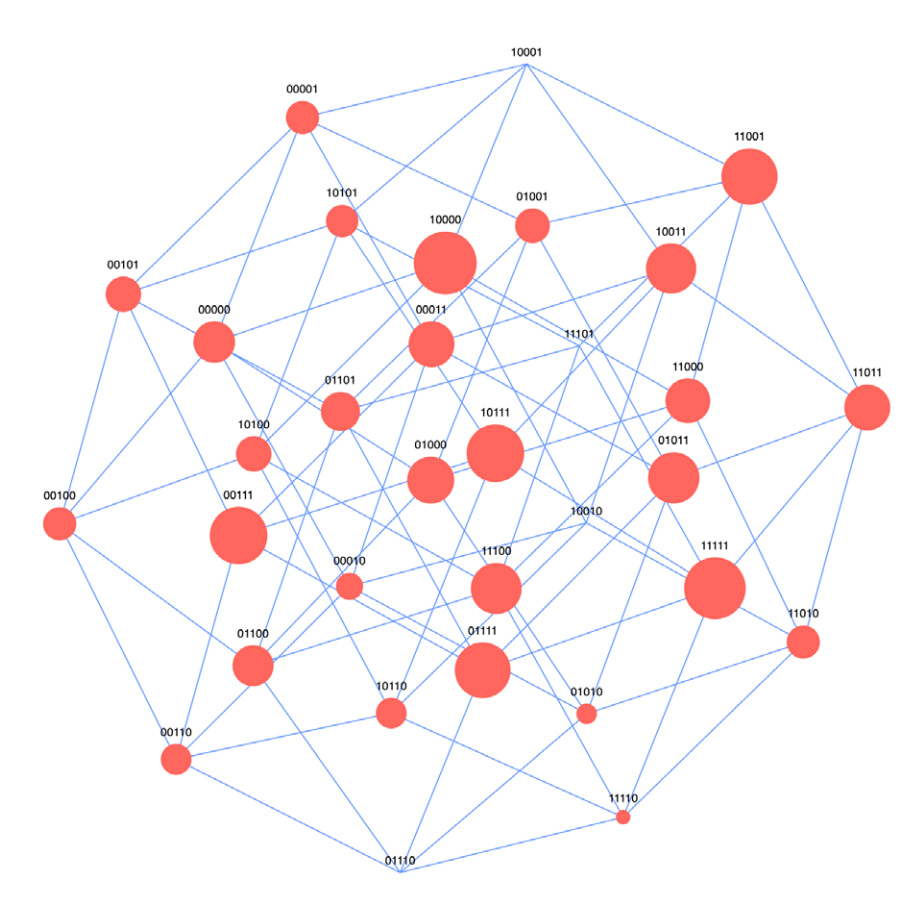
Message: job is succeeded

4量子ビットスケラブル美的回路の測定結果
Measurement Results of the 4-Qubit Scalable Aesthetic Circuit



Job ID: 06875aca-bbf1-7452-8000-34c5262f0882
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/15/2025 10:19:40
Ready at: 07/15/2025 10:19:49
Running at: 07/15/2025 10:19:50
Ended at: 07/15/2025 10:19:51
Execution time (sec): 1.274
Message: job is succeeded

5量子ビットスケラブル美的回路の測定結果
Measurement Results of the 5-Qubit Scalable Aesthetic Circuit



Job ID: 06875acc-11c3-70af-8000-c9961c218d81
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/15/2025 10:20:01
Ready at: 07/15/2025 10:20:09
Running at: 07/15/2025 10:20:10
Ended at: 07/15/2025 10:20:11
Execution time (sec): 1.318
Message: job is succeeded

3.2 統計美学:断片、測定、そして未完の全体性へ

Statistical Aesthetics: Fragments, Measurement, and toward an Unfinished Wholeness

19世紀のロマン主義の詩人たち——シュレーゲルやノヴァーリスは、「断片」や「種子」を、単なる未完成な部分ではなく、無限で不可知の全体を指し示すエンジン＝生成過程の出発点として位置付けた。マラルメは偶然性と空白を、データのノイズや欠測値のように扱いながら、それらを新たな構造＝星座 (constellation) として配置し直すことで詩的空間を生み出した。ブランショは、断片が全体の一部や部分ではなく、むしろ私たちに、全体の「不確定性」や「外部性」を経験させる装置であることを強調した。

一方、量子力学において、その物理系は測定前にはすべての重ね合わせの可能性を持ち、測定というサンプリングを通じて1つの確定値に収束する。その収束の仕方は確率的であり、多数の測定サンプリングの統計的分布から、もとの情報構造の影が立ち現れる。さらに近年のデコヒーレンス理論——環境との相互作用によって量子状態が古典状態へと移行する——の考え方によれば、現実を決定するのは主体としての観測者ではなく、日々のキャリブレーションや外部ノイズをもたらす環境そのものが、現実の選択者となる。

こうした詩学と量子力学の構造的な類似は、局所的な経験や個々の測定の集合から、直接アクセスできない全体を推定・想像しようとする統計的態度にある。一回限りのサンプルでしかない個別の断片やデータは二度と再現できないが、その集合としてのふるまいが、系の持つ「意味」や「現実」を描き出す。

ブランショ的、つまりデコヒーレンス的な観点では、全体の統合的把握ではなく、関係の非局所性や、主体と客体の拡散的ネットワークから新たな現実像が立ち現れる。この星座的思考は、単線的・因果的歴史のパーツとしての個々の断片ではなく、カレン・バラッドが「イントラ=アクション (intra-action)」と名付けたような、内的な関係から出現する多元的・並列的な相関構造や配置そのものを美学の対象とみなす。

厳密な因果律による一意的・決定論的世界像が崩壊した後に現れる統計美学は、知る者と知られる対象が不可分に絡み合い、両者の関係と内的作用の中から、常に未完で、複数的で、流動的な全体性が現れたり消えたりし続ける世界観を開く。



Job ID: 06870786-38b1-78ef-8000-4a07f08eacec

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/11/2025 11:35:16

Ready at: 07/11/2025 11:35:21

Running at: 07/11/2025 11:35:21

Ended at: 07/11/2025 11:35:24

Execution time (sec): 2.567

Message: job is succeeded

5量子ビットスケラブル美的量子回路の1024ショットの測定結果を、測定順に並べたもの。

4.

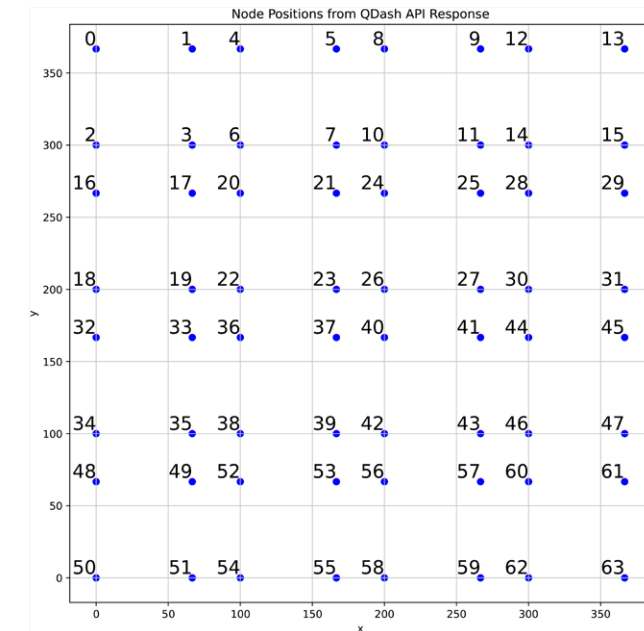
Quantum Chip Bitmap

量子チップビットマップ

「量子チップビットマップ」は、超伝導量子コンピュータの量子チップを計算メディアとしてではなく、芸術作品を生み出すためのキャンバスとして捉え直す芸術的实践である。このアプローチでは、量子チップ上の量子ビットの物理的な配置や状態そのものを、つまりチップ上の量子ビットが「今、どのような量子状態にあるか」に着目し、そこに量子状態の物質性にもとづく美的な価値を見出そうとする。

量子ゲートによる量子ビットの操作を、ピクセルの色を反転させたり、明るさを調整したりする「描画ツール」として再解釈する。具体的には以下のゲートを描画ツールをみなし、これらを手続的に組み合わせていくことで、量子チップというキャンバス上に、確率的なピクセルアートを描いていく。

- Xゲート:ピクセルの白黒反転
- SXゲート:重ね合わせによるピクセルの明度操作
- CNOTゲート:量子もつれによるピクセルの構造的結合



量子チップ上の量子ピクセル配列
Quantum Pixel Grid on the Chip

4.1 破壊から生成へ
From Destruction to Creation

超伝導量子コンピュータの量子チップ上に配置された量子ビットを、操作可能なデザイン素材(designable matter)と捉えれば、量子コンピュータの計算能力やその結果ではなく、量子ビットの物理的な配置や状態、その変化自体が創作や鑑賞の対象となる。

量子情報美学では、「どのような状態が美的か」という問いよりもむしろ、「量子コンピュータ内部で情報の関係や構造がいかに生成され、私たちがそれをどのように鑑賞し、想像できるのか」に焦点を当ててきた。「量子チップビットマップ」は、そうした不可知の美学に対置するものとして、量子コンピュータの物質的／身体的側面に注目する。

量子情報の単位としての量子ビットを、物理的実体としての描画ピクセルとみなすことで、量子ビットの配置という幾何構造がそのまま表現構造となる。そして、量子状態を変化させるための基本手段であるゲート操作が描画行為となる。可視的な配置上の不可知な状態だったチップ上の量子ビットが、測定を通じて初めて「像」として立ち現れる。それは、量子状態に潜在していたイメージを可視化する、一種のレンダリング作業のようでもある。しかし、ここでのレンダリングは、その結果対象が不可逆的に破壊されるという点で、1960年代にグスタフ・メッツガーらが提唱した「自己破壊芸術(ADA, Auto-Destructive Art)」を想起させる。

メッツガーは、芸術が社会や物質の消費構造と結びついていることを可視化するため、作品が自ら壊れていく過程そのものを芸術とみなした。量子チップビットマップにおいても、測定前の量子状態を直接見ることはできず、それを破壊することでのみ、作品としての「像」が出現する。ここで「見ること＝壊すこと」であり、壊さなければ見ることはできない。

測定前の量子状態は、存在しているが決して見えない「原作品(ur-form)」であり、測定後に得られる像は、その断片的で確率的、さらに物質的なエラーを含んだ影である。量子チップビットマップという量子的自己破壊芸術は、一度きりの破壊＝測定で完結する作品ではなく、「原作品」の生成と破壊を幾度も繰り返すことで、初めてその影が立ち現れる反復的生成芸術でもある。そして同時にそれは、測定という破壊から、新たな影が統計的に生成される自己生成芸術(ACA, Auto-Creative Art)でもある。

次ページから始まる、一回り大きい判型の分冊で「量子チップビットマップ」の作例を紹介する。この分冊では、量子計算の本性と呼応する、一回性、偶然性を有したリソグラフ印刷を採用した。不可知なものの美学を探究する本論考前半の「量子情報美学」と、量子コンピュータの身体性に根ざした後半の「量子チップビットマップ」の相補性が、それぞれの印刷方法とも呼応している。

本冊子は2025年5月から7月にかけて、大阪大学QIQBの超伝導量子コンピュータ上の量子ビットを直接操作して生成したピクセル画像の記録集である。各見開きの右ページ中央に、この「量子チップビットマップ」が配置されている。

左ページには、量子コンピュータに投入したジョブの詳細なログが掲載されている。さらに画像は逆時系列順に配置されていて、量子コンピュータの性能向上の過程を反映している。

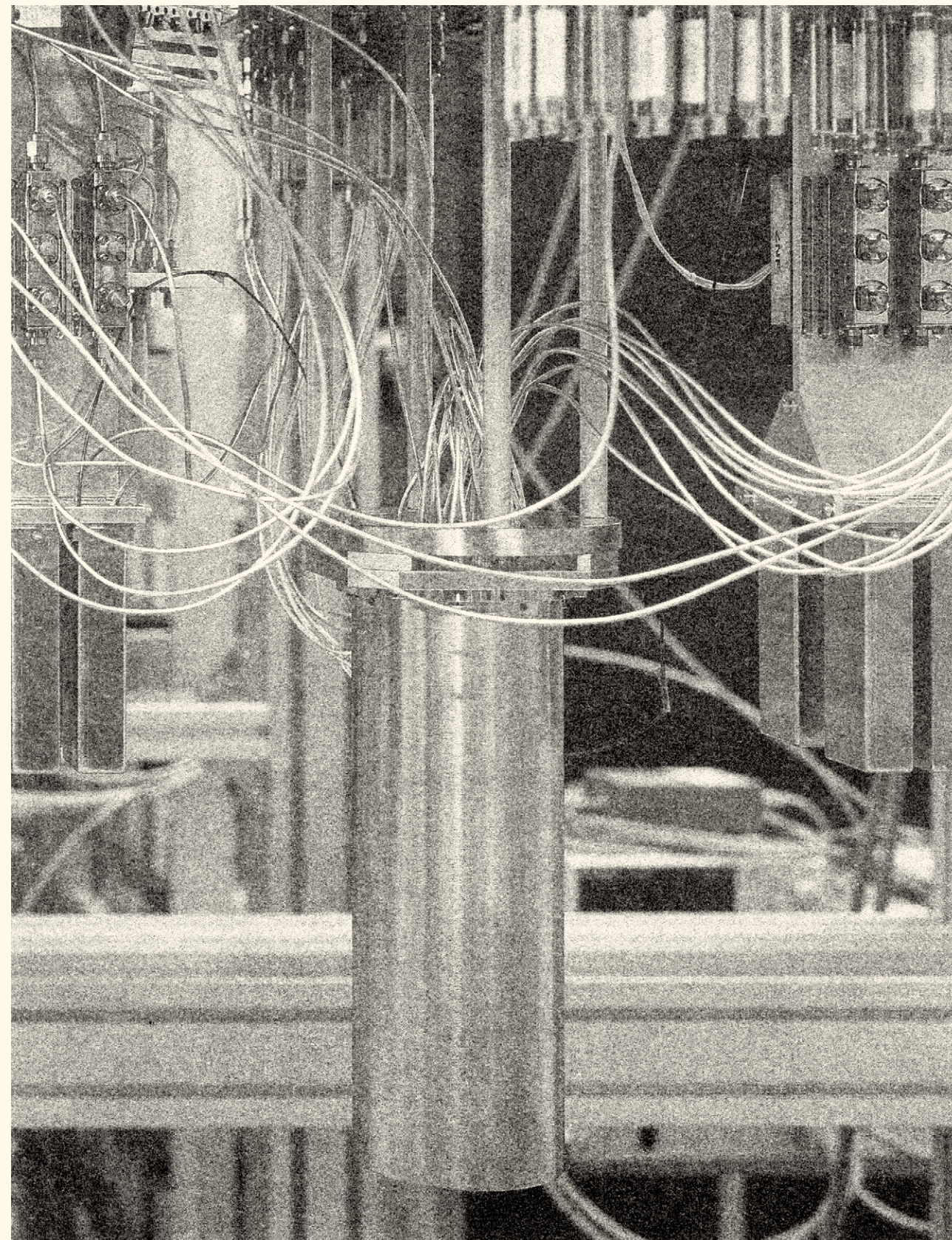
最後の3枚の画像は、美的な量子状態の測定生データである。量子計算に本質的に備わる確率性やランダム性を物語りながら、芸術と科学の相互作用の中で、いかに「エラー」や「不完全さ」が独自の美学となり得るかを示唆している。

本冊子の印刷にはリソグラフを採用した。この印刷は、色ズレや粒状感、印刷ごとの誤差やエラーが生じやすく、同じデータでも一枚ごとに異なる風合いが、量子計算の特徴と共鳴している。

This booklet is a collection of pixel images generated by directly manipulating the qubits of a superconducting quantum computer at QIQB, The University of Osaka, between May and July 2025. At the center of each right-hand page is a “Quantum Chip Bitmap,” created through the direct operation on qubits. The left-hand pages present detailed logs of the jobs submitted to the quantum computer. The images are arranged in reverse chronological order, reflecting the progressive improvement on the quantum computer’s performance.

The final three images showcase raw measurement data from aesthetic quantum states. These works highlight the inherent probabilistic nature and randomness of quantum computation, and suggest how “errors” and “imperfection” can acquire a unique aesthetic value within the interplay of art and science.

This booklet was printed using the Risograph technique. This method naturally introduces color misalignment, graininess, and slight variations in each print, resulting in a unique texture for every sheet — even when produced from the same data. In this way, the printing process itself resonates with the inherent characteristics of quantum computation.



Job ID:06879b03-cf2a-7d72-8000-692b30eb3191

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/18/2025 11:23:57

Ready at: 07/18/2025 11:24:04

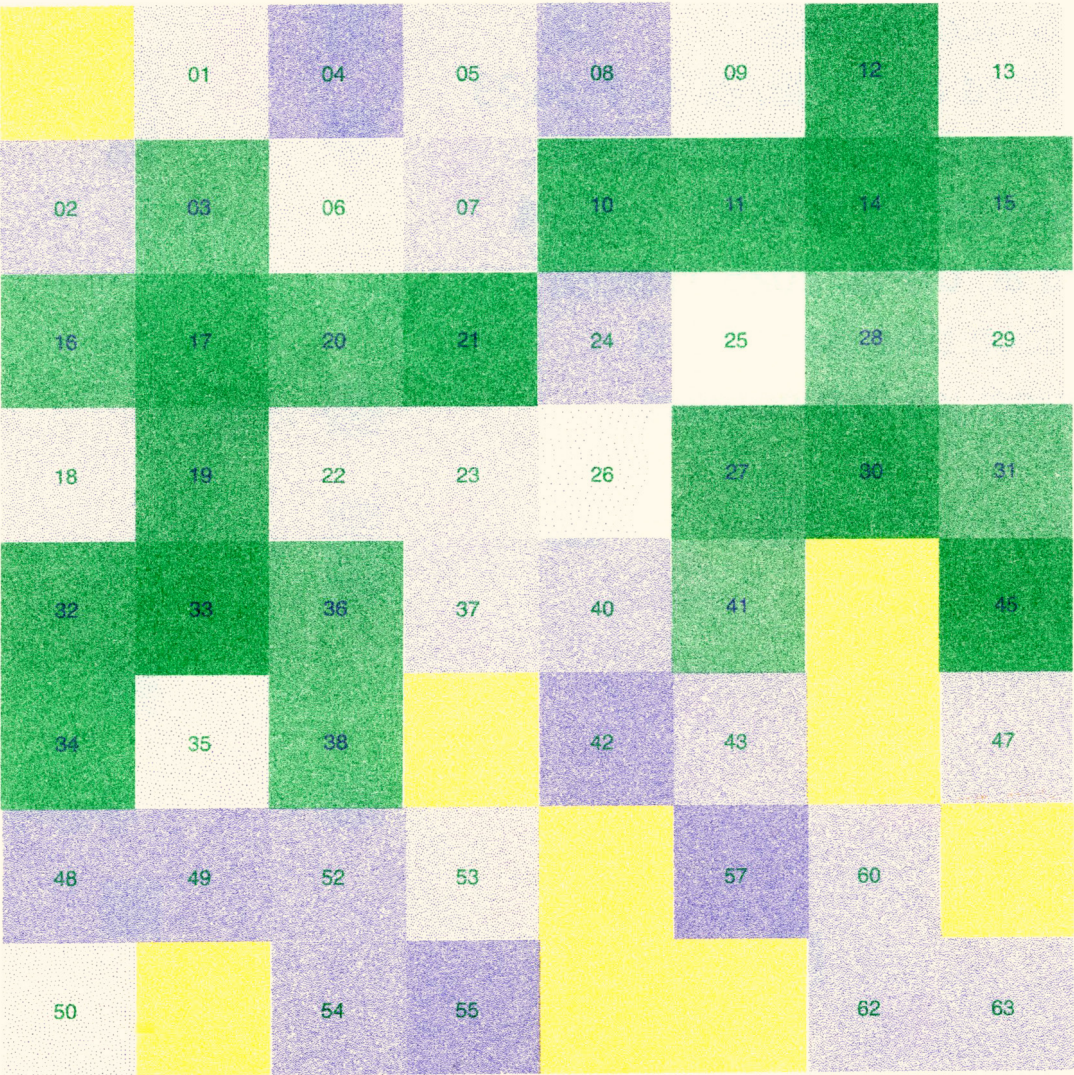
Running at: 07/18/2025 11:24:04

Ended at: 07/18/2025 11:24:07

Execution time (sec): 2.617

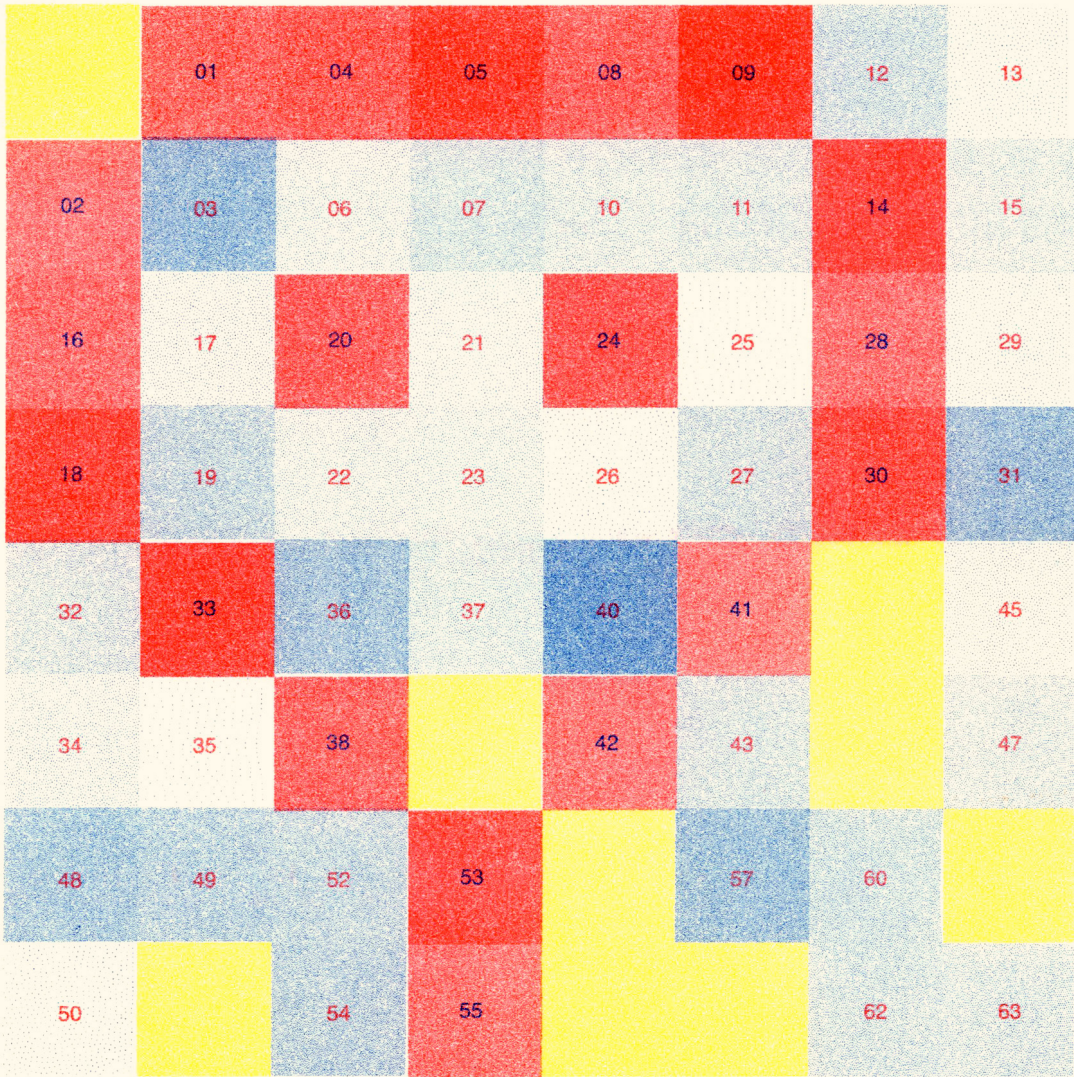
Message: job is succeeded

緑のピクセルはXゲートで反転したターゲット量子ビット、紫はそれ以外の何も操作していない量子ビット。いずれも1が測定された数によってピクセルの色の濃さ
が変化する。黄のピクセルは使用（測定）していない量子ビット。
Green pixels indicate target qubits flipped by X-gates, purple pixels represent
untouched qubits, and for both, the color intensity of each pixel reflects the
number of times '1' was measured. Yellow pixels indicate qubits that were not
used (measured).



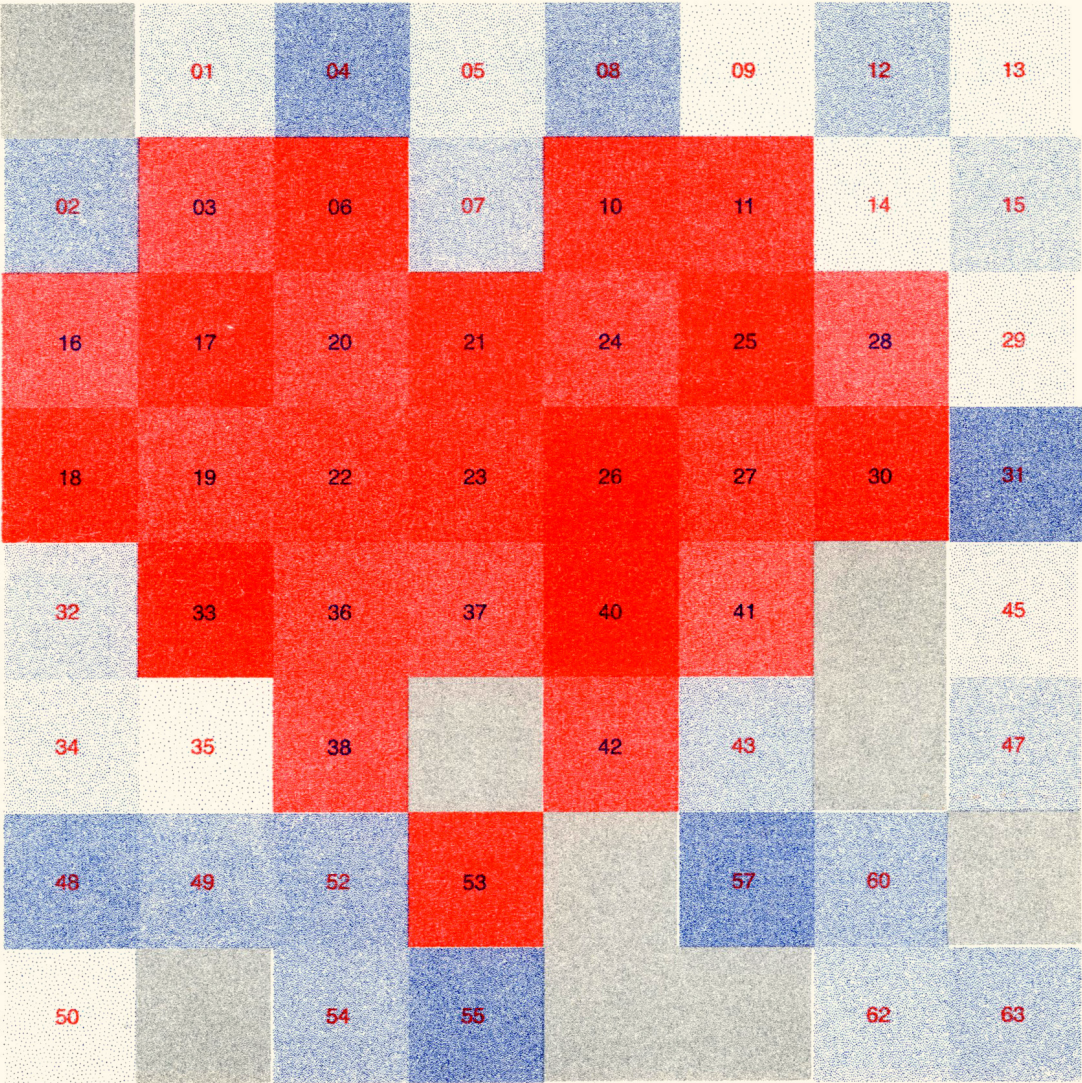
Job ID: 06879b32-7665-7c2c-8000-d155a8fa30e9
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/18/2025 11:36:23
Ready at: 07/18/2025 11:36:24
Running at: 07/18/2025 11:36:24
Ended at: 07/18/2025 11:36:26
Execution time (sec): 2.555
Message: job is succeeded

赤のピクセルはXゲートで反転したターゲット量子ビット、青はそれ以外の何も操作していない量子ビット。いずれも1が測定された数によってピクセルの色の濃さ
が変化する。黄のピクセルは使用（測定）していない量子ビット。
Red pixels indicate target qubits flipped by X-gates, blue pixels represent
untouched qubits, and for both, the color intensity of each pixel reflects the
number of times '1' was measured. Yellow pixels indicate qubits that were not
used (measured).

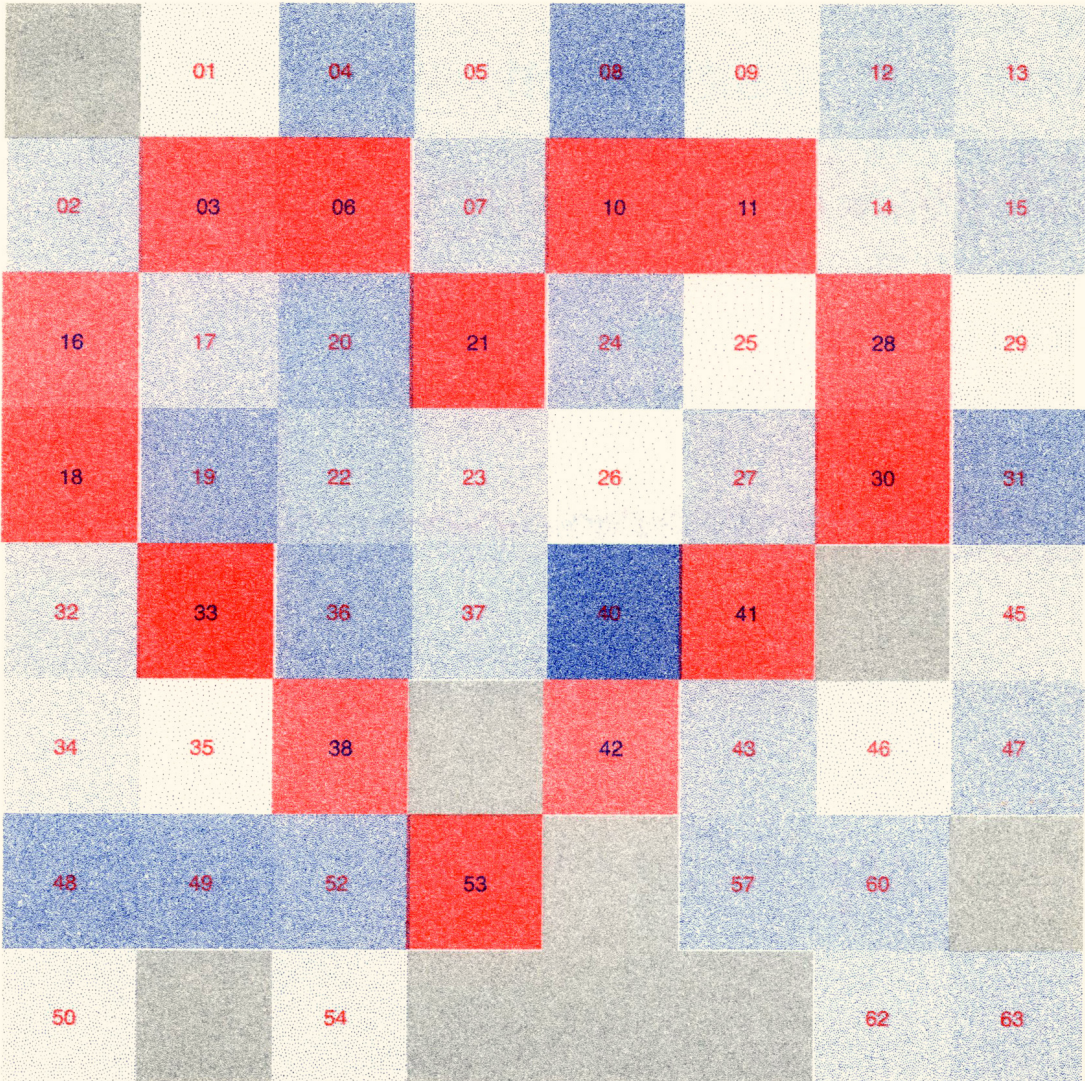


Job ID: 06879b2e-1e86-76f5-8000-7b7e7e1d2e03
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/18/2025 11:35:14
Ready at: 07/18/2025 11:35:23
Running at: 07/18/2025 11:35:24
Ended at: 07/18/2025 11:35:26
Execution time (sec): 2.567
Message: job is succeeded

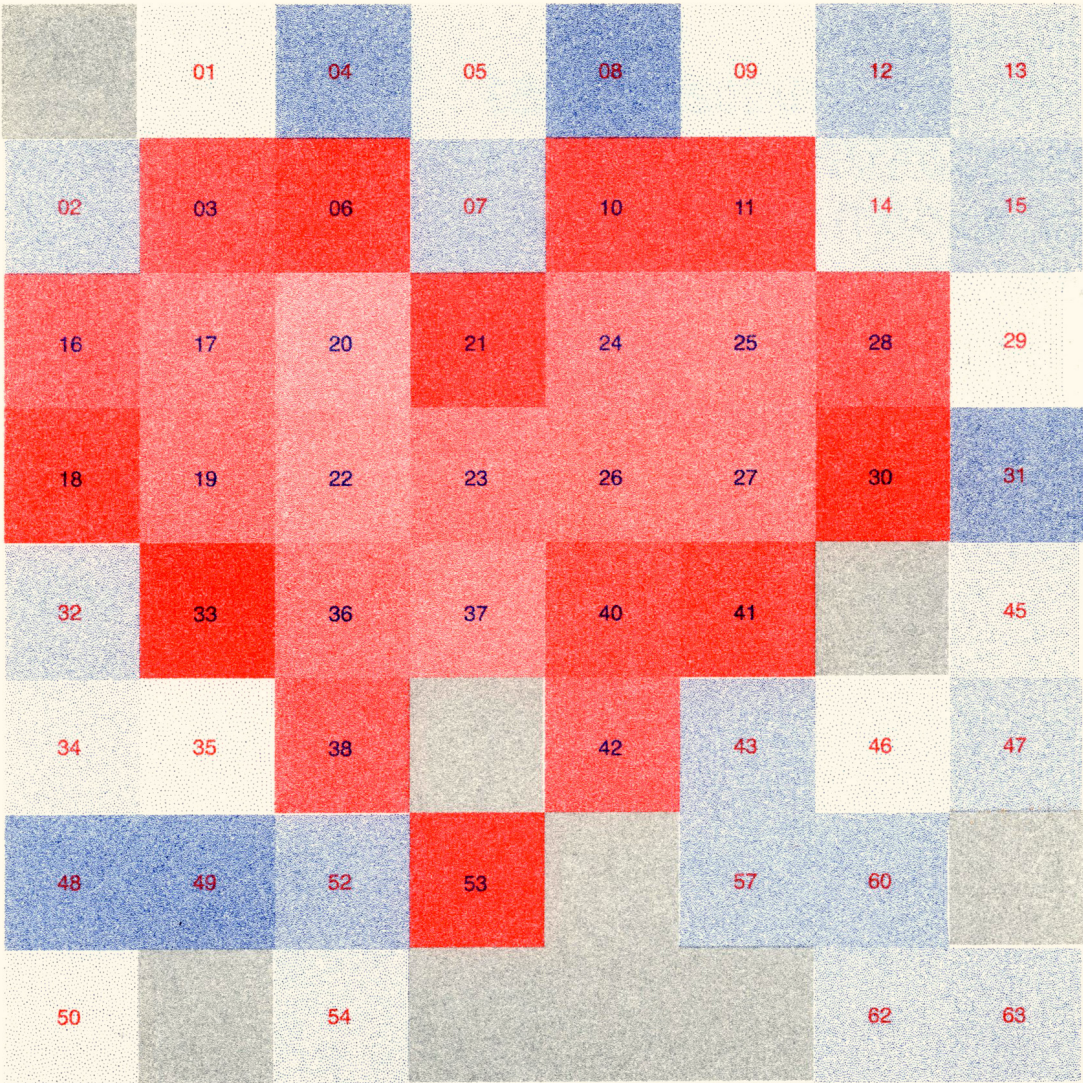
赤のピクセルはXゲートで反転したターゲット量子ビット、青はそれ以外の何も操作していない量子ビット。いずれも1が測定された数によってピクセルの色の濃さ
が変化する。灰色のピクセルは使用（測定）していない量子ビット。
Red pixels indicate target qubits flipped by X-gates, blue pixels represent
untouched qubits, and for both, the color intensity of each pixel reflects the
number of times '1' was measured. Gray pixels indicate qubits that were not
used (measured).



Job ID: 0687066b-728d-797f-8000-2c797b55966a
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 10:19:51
Ready at: 07/11/2025 10:20:01
Running at: 07/11/2025 10:20:01
Ended at: 07/11/2025 10:20:13
Execution time (sec): 11.303
Message: job is succeeded

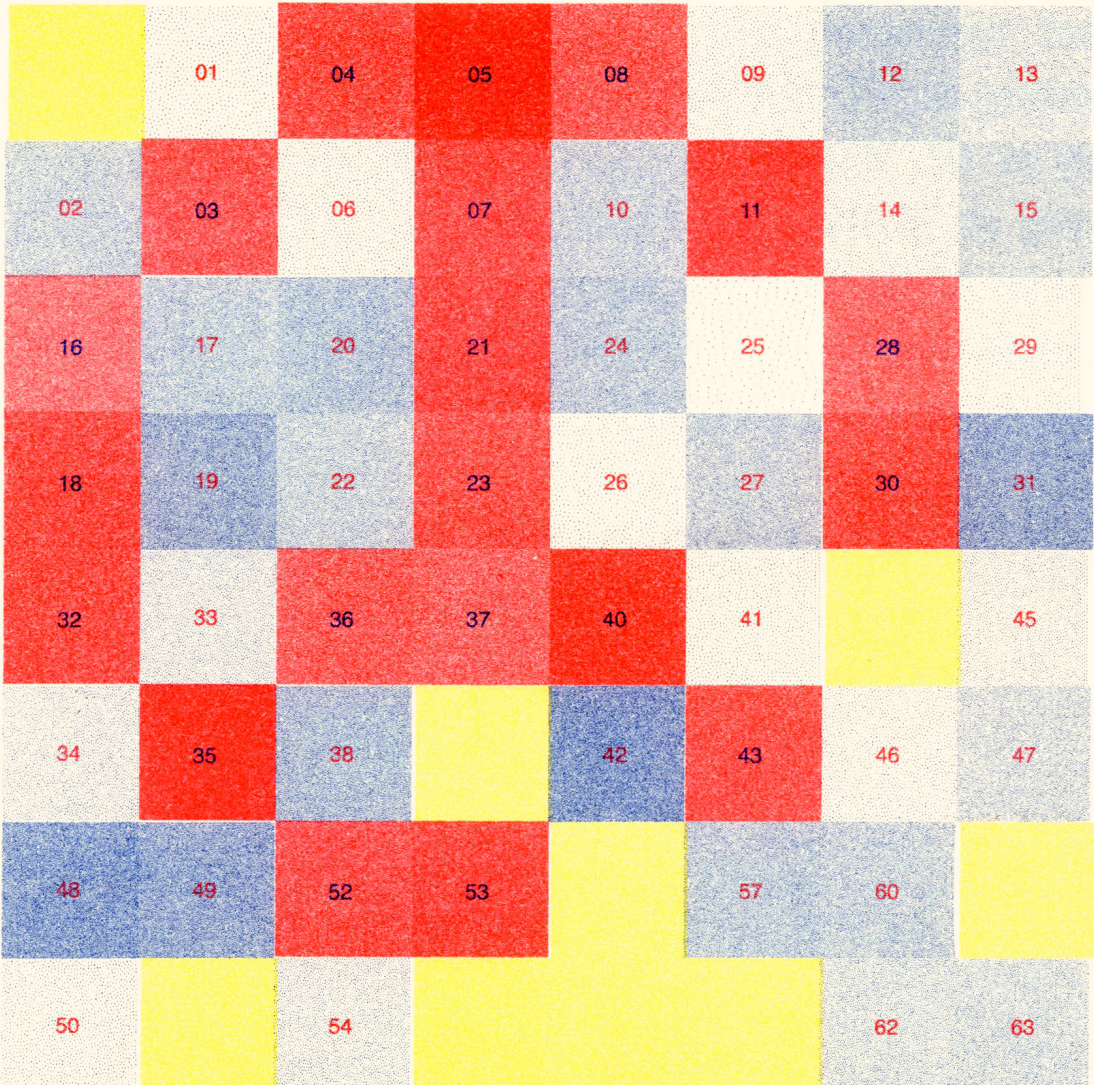


Job ID: 068706d1-e83e-73a6-8000-2514958937b3
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 10:47:11
Ready at: 07/11/2025 10:47:11
Running at: 07/11/2025 10:47:11
Ended at: 07/11/2025 10:47:23
Execution time (sec): 11.278
Message: job is succeeded

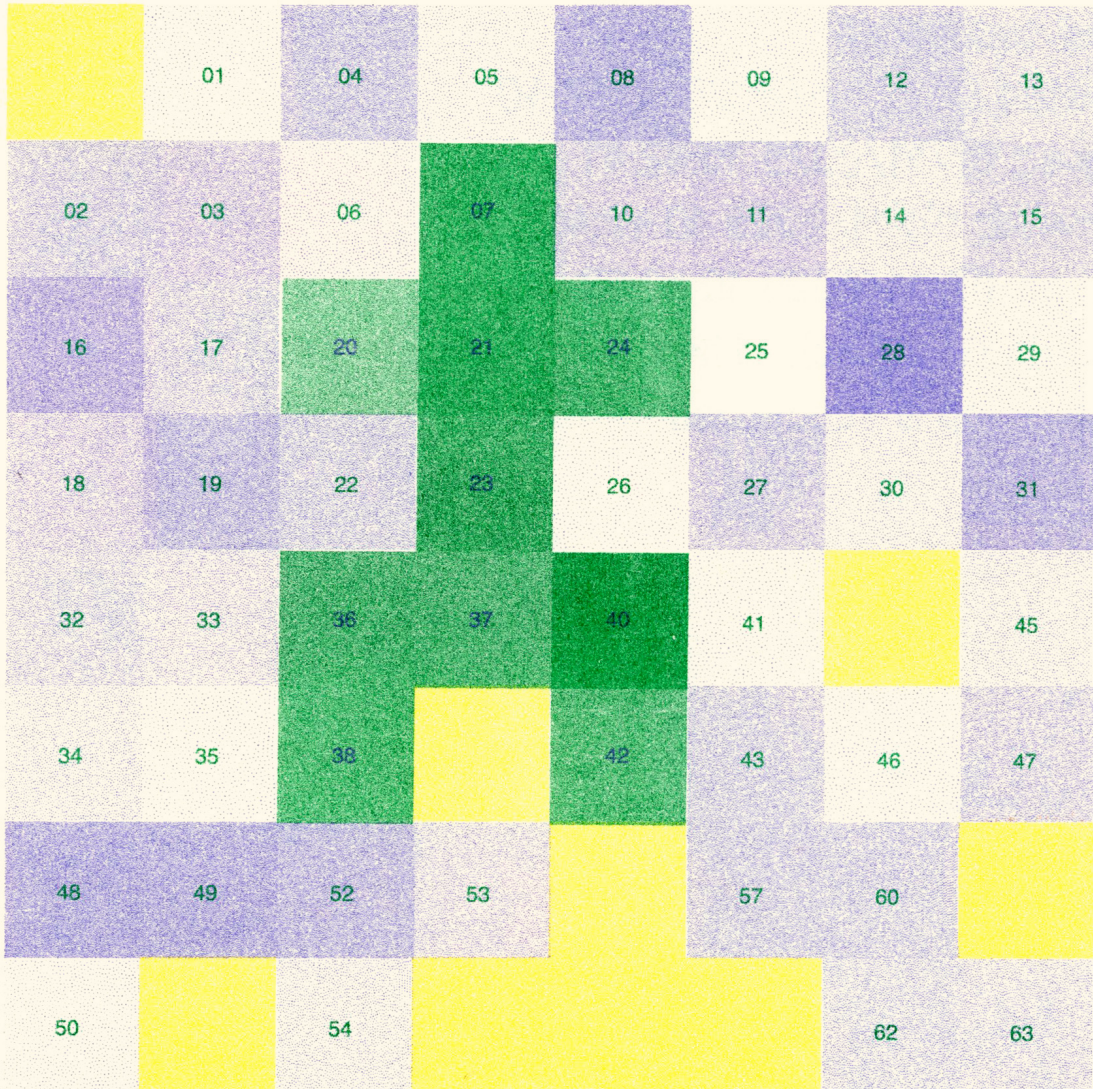


ハート内部の量子ビットにSXゲートを適用して重ね合わせ状態にした (50%の確率で1が測定される)。
SX gates were applied to the qubits inside the heart, creating superposition states (resulting in a 50% probability of measuring '1').

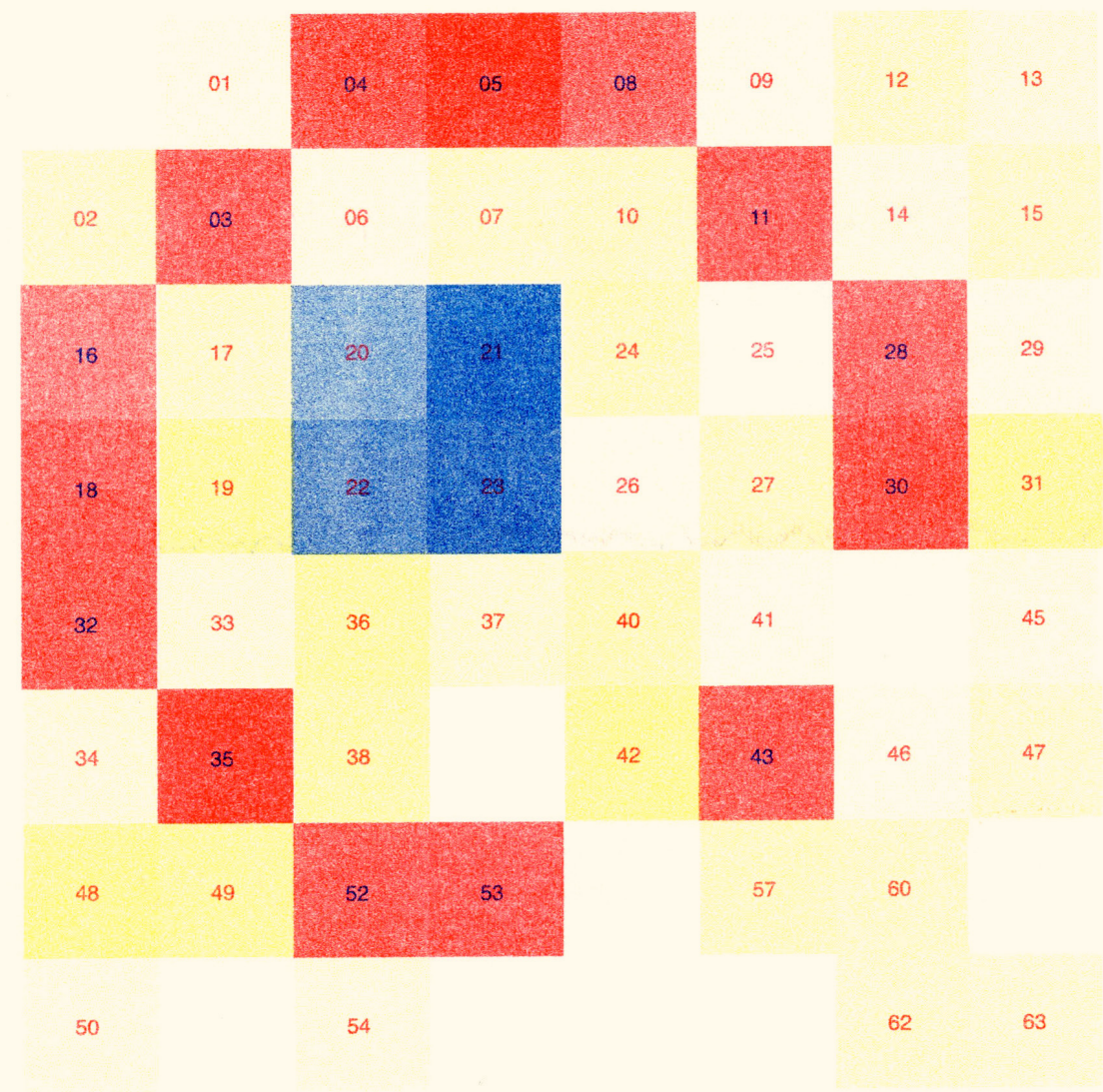
Job ID: 068706b6-8efe-7ca0-8000-bcff421fe745
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 10:39:53
Ready at: 07/11/2025 10:40:01
Running at: 07/11/2025 10:40:01
Ended at: 07/11/2025 10:40:13
Execution time (sec): 11.389
Message: job is succeeded



Job ID: 0687069f-a147-7419-8000-0ed1beaa41db
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 10:33:46
Ready at: 07/11/2025 10:33:51
Running at: 07/11/2025 10:33:51
Ended at: 07/11/2025 10:34:03
Execution time (sec): 11.507
Message: job is succeeded

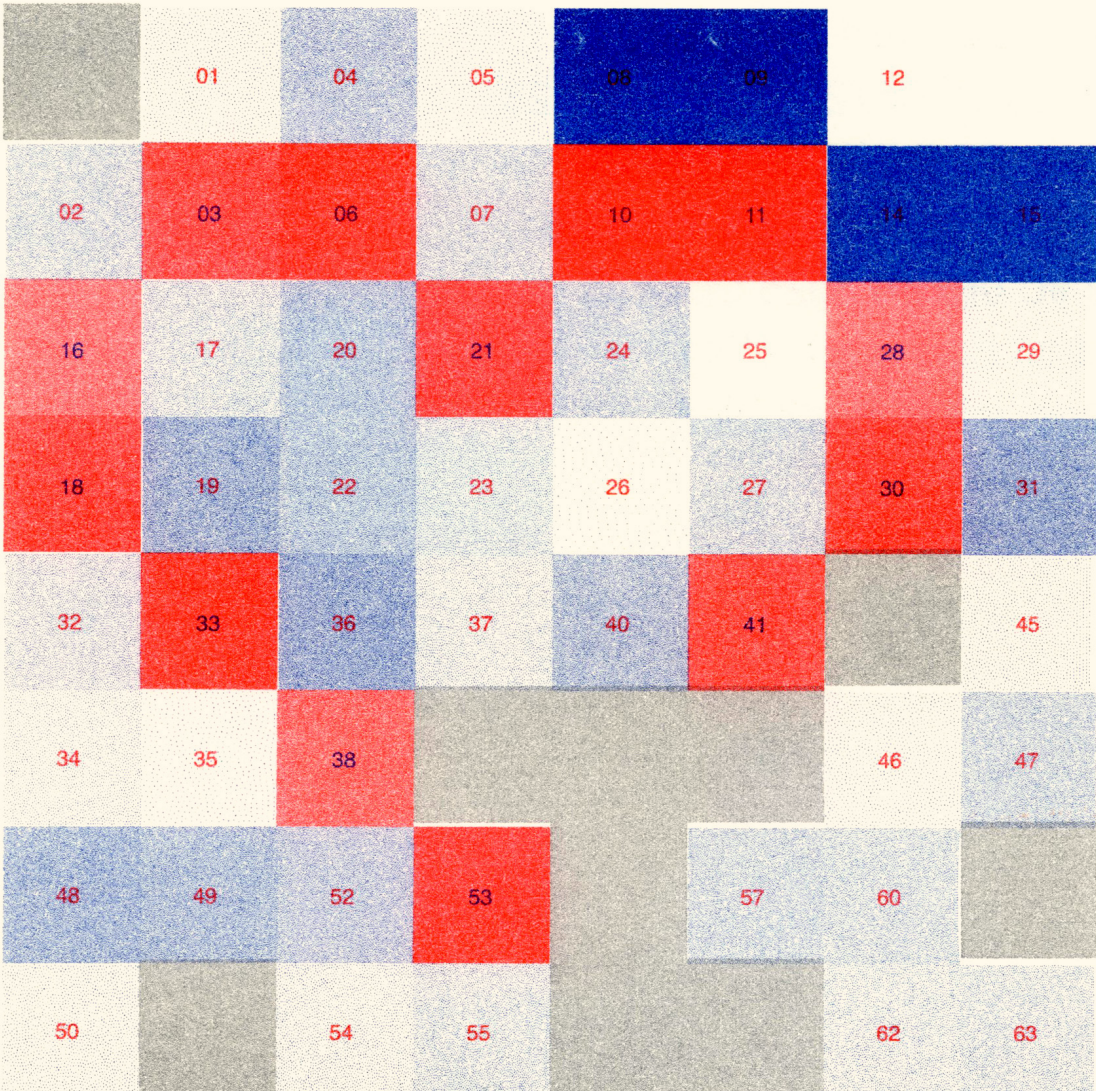


Job ID: 068706c1-07ea-7c80-8000-9d00914f2e06
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 10:42:40
Ready at: 07/11/2025 10:42:41
Running at: 07/11/2025 10:42:41
Ended at: 07/11/2025 10:42:53
Execution time (sec): 11.643
Message: job is succeeded



赤と青のピクセルがXゲートで反転したターゲット量子ビット、灰色はそれ以外の量子ビット。いずれも1が測定された数によって色の濃さが変化する。
Red and blue pixels indicate target qubits flipped by X-gates, while gray pixels represent all other qubits. For all pixels, color intensity reflects the number of times '1' was measured.

Job ID: 06867346-9c2a-7a45-8000-d701fbf1a51c
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 07/04/2025 10:54:50
Ready at: 07/04/2025 10:54:58
Running at: 07/04/2025 10:54:59
Ended at: 07/04/2025 10:55:10
Execution time (sec): 11.087
Message: job is succeeded



Heart 250627

x

Job ID: 0685e058-6828-778d-8000-0f1dbe7be772

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 06/27/2025 11:44:23

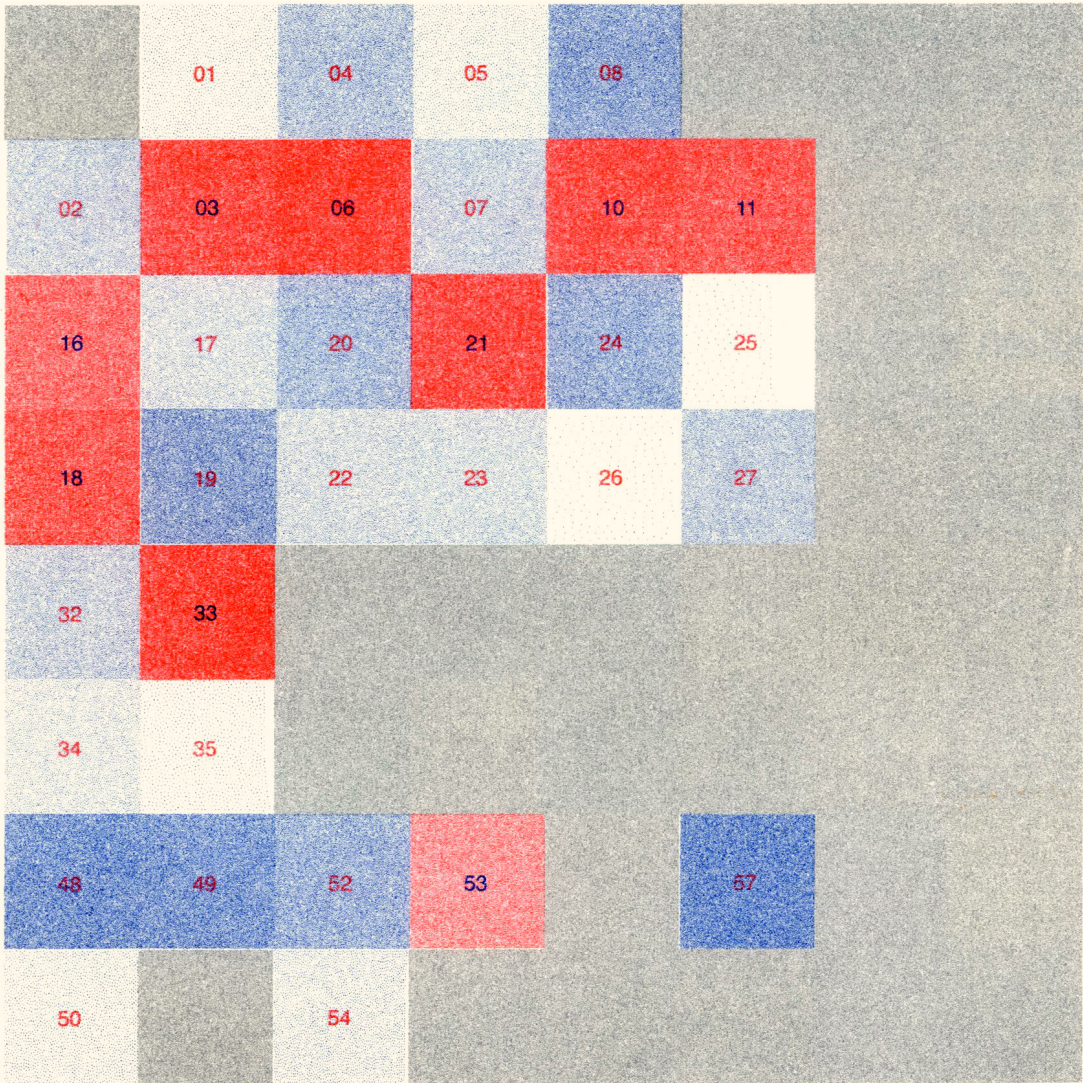
Ready at: 06/27/2025 11:44:28

Running at: 06/27/2025 11:44:28

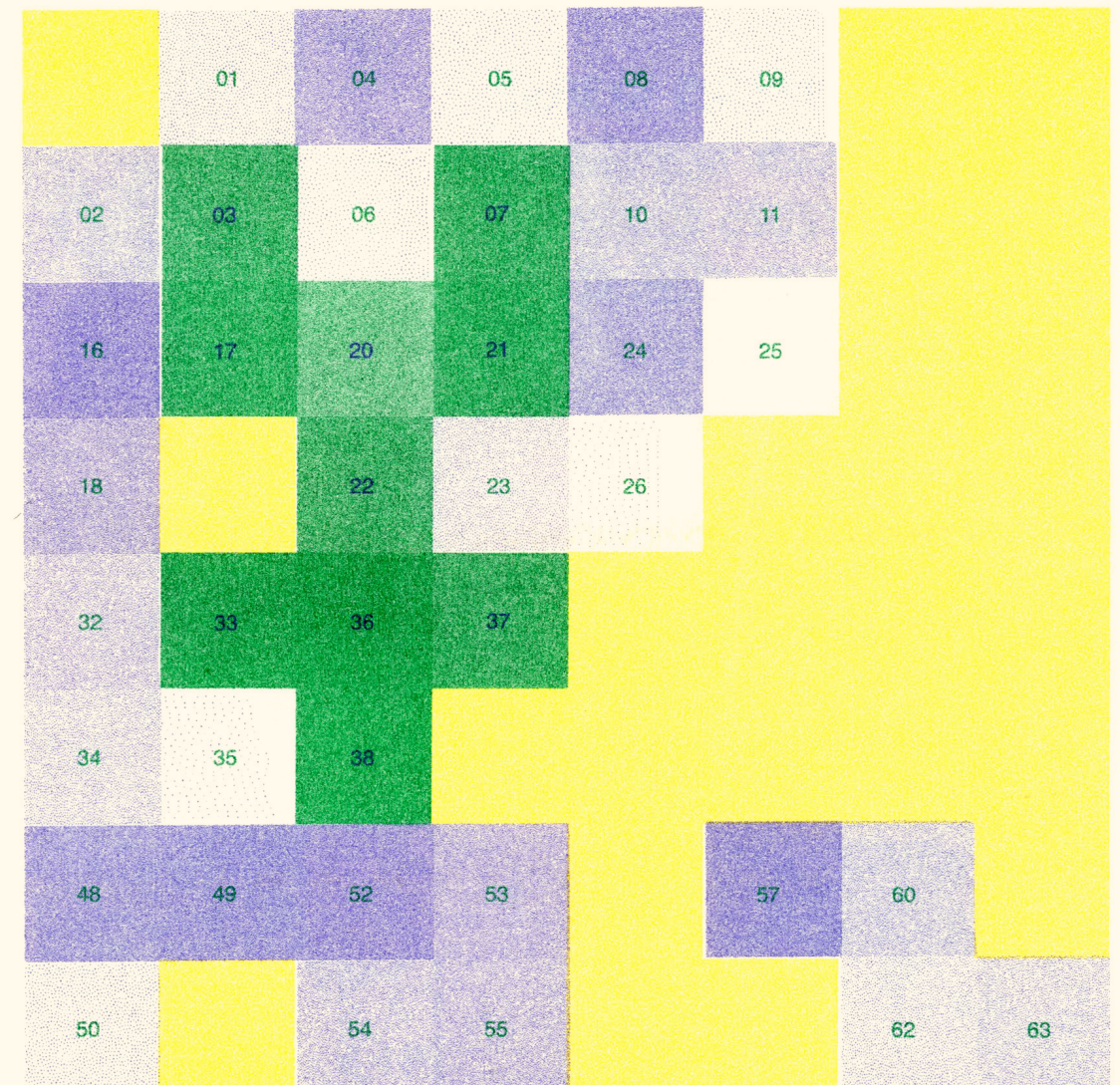
Ended at: 06/27/2025 11:44:35

Execution time (sec): 7.544

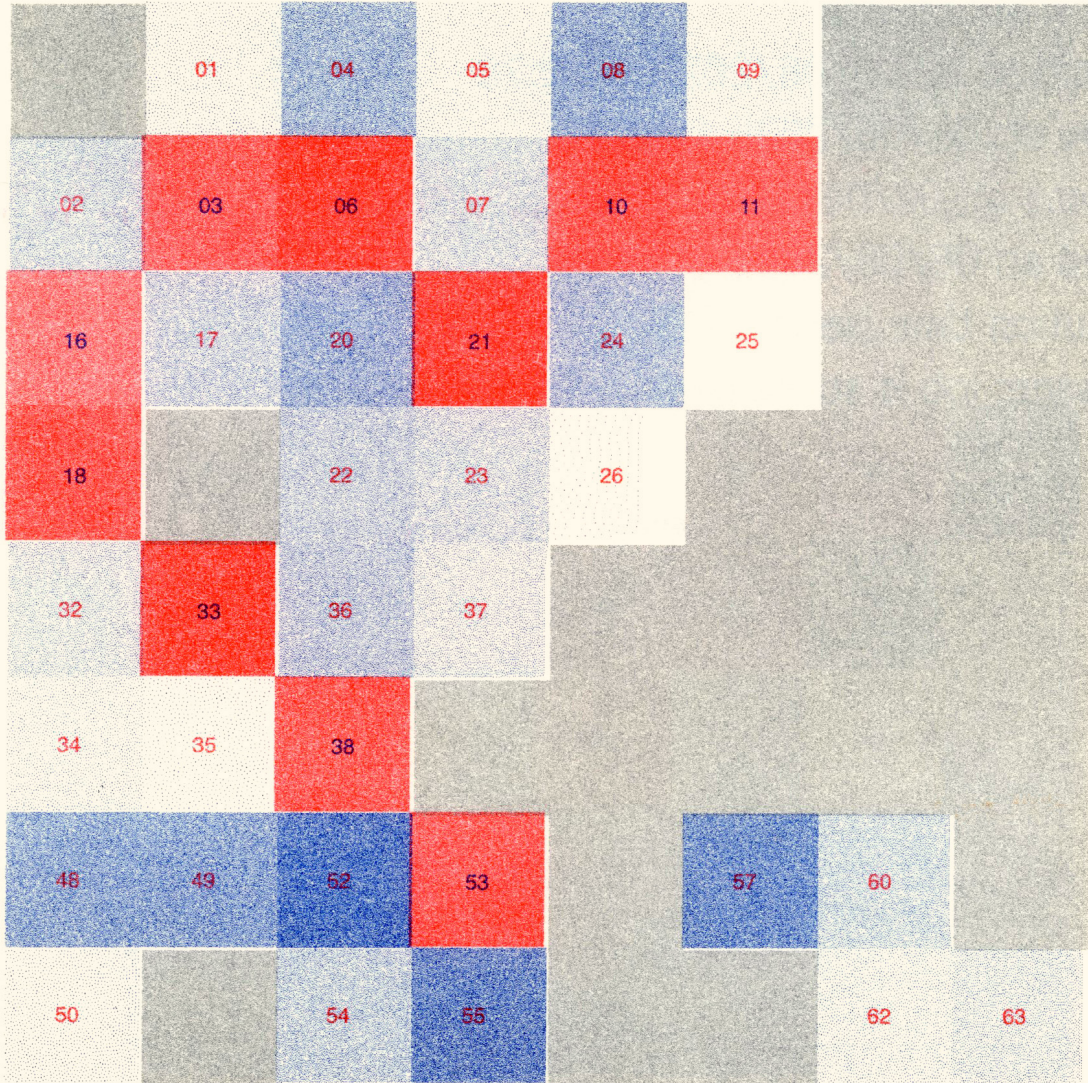
Message: job is succeeded



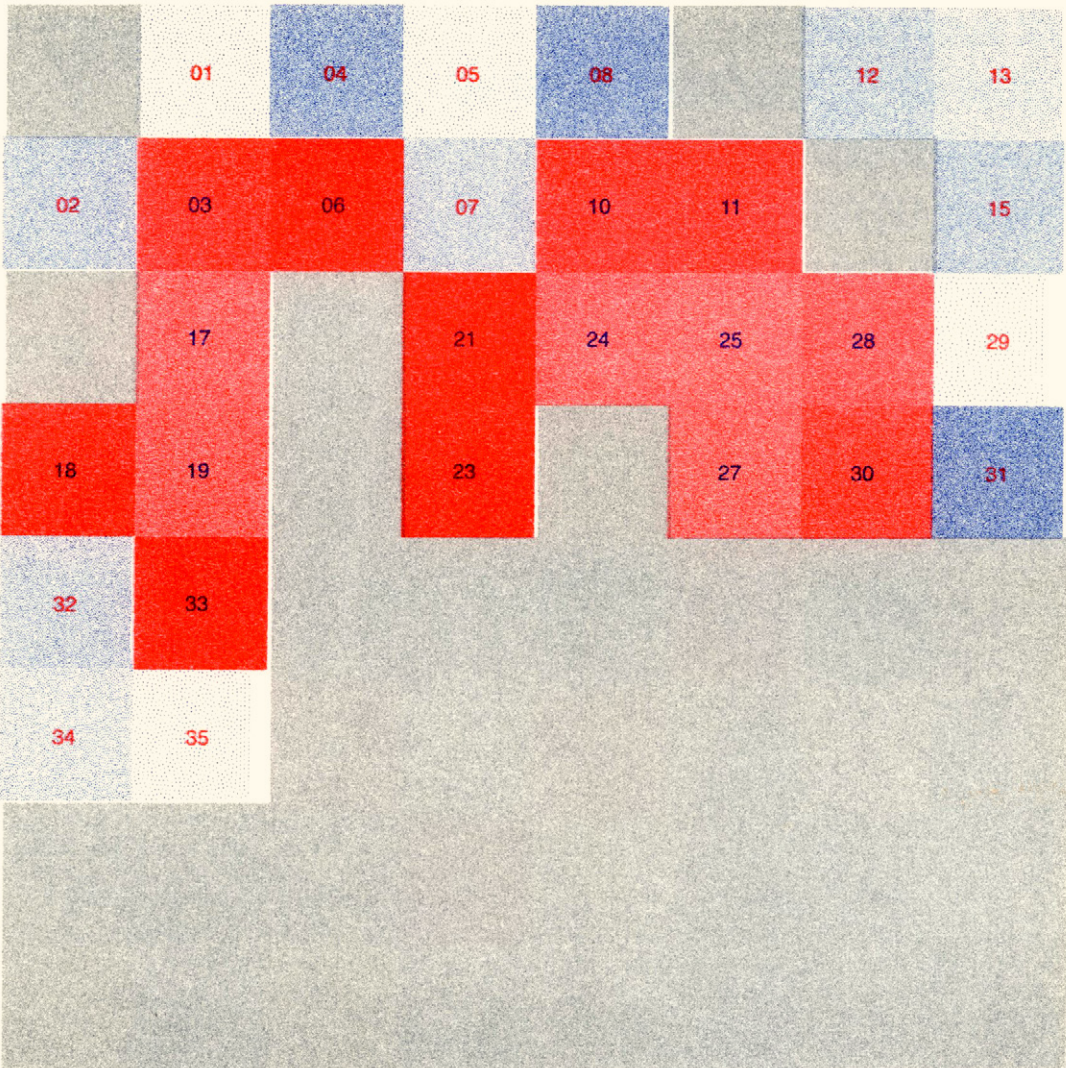
Message: job is succeeded



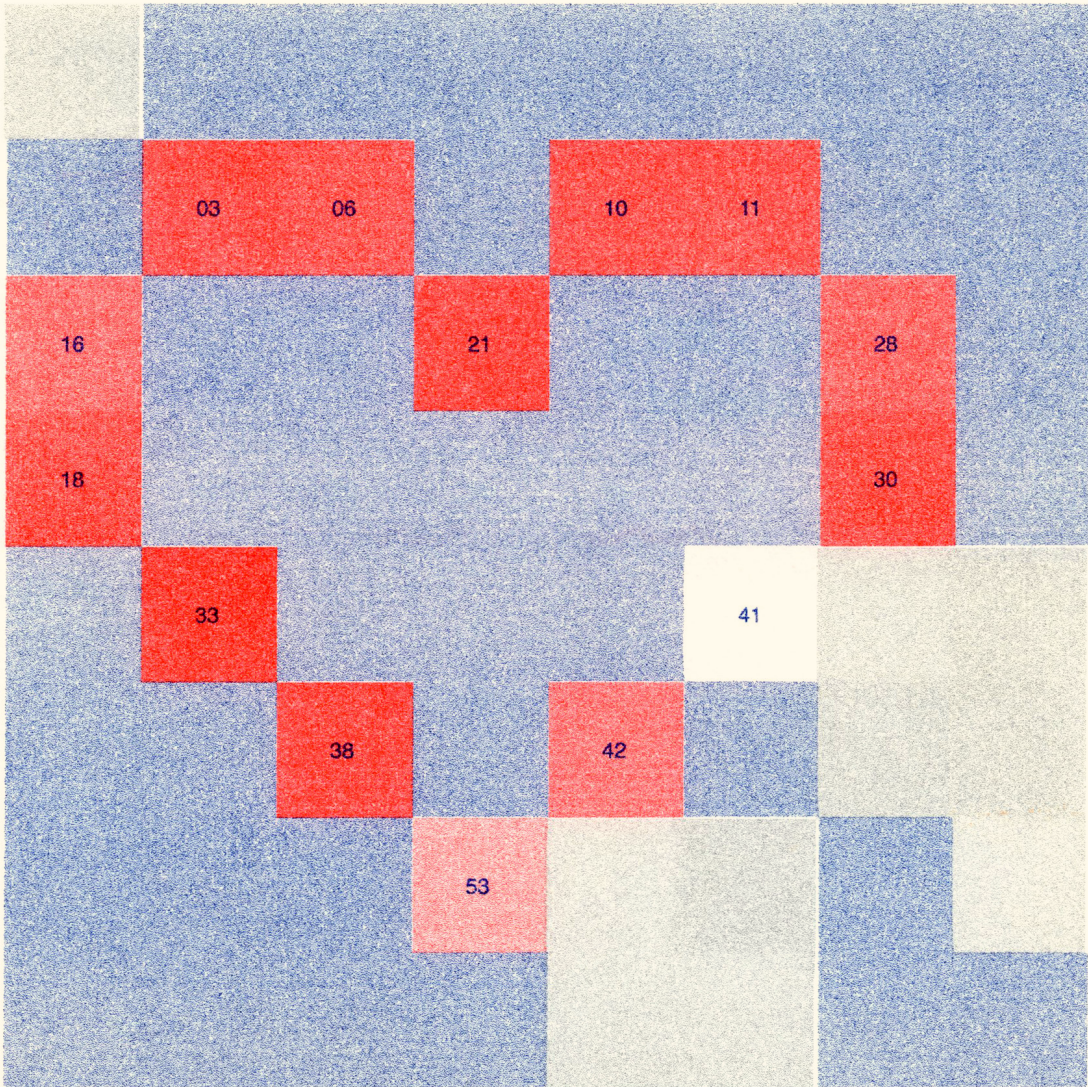
Job ID: 0684b80a-a5d6-7e32-8000-8cfe182b512b
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 06/13/2025 10:36:42
Ready at: 06/13/2025 10:36:48
Running at: 06/13/2025 10:36:48
Ended at: 06/13/2025 10:36:57
Execution time (sec): 8.293
Message: job is succeeded



Job ID: 06842598-fdcd-782d-8000-1cd1b0b619f4
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 06/06/2025 11:59:28
Ready at: 06/06/2025 11:59:28
Running at: 06/06/2025 11:59:28
Ended at: 06/06/2025 11:59:35
Execution time (sec): 6.715
Message: job is succeeded



Job ID: 06836cb9-85f1-791a-8000-6e1e8ce58479
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 1024
Status: succeeded
Submitted at: 05/28/2025 17:38:48
Ready at: 05/28/2025 17:38:51
Running at: 05/28/2025 17:38:51
Ended at: 05/28/2025 17:38:55
Execution time (sec): 3.8
Message: job is succeeded



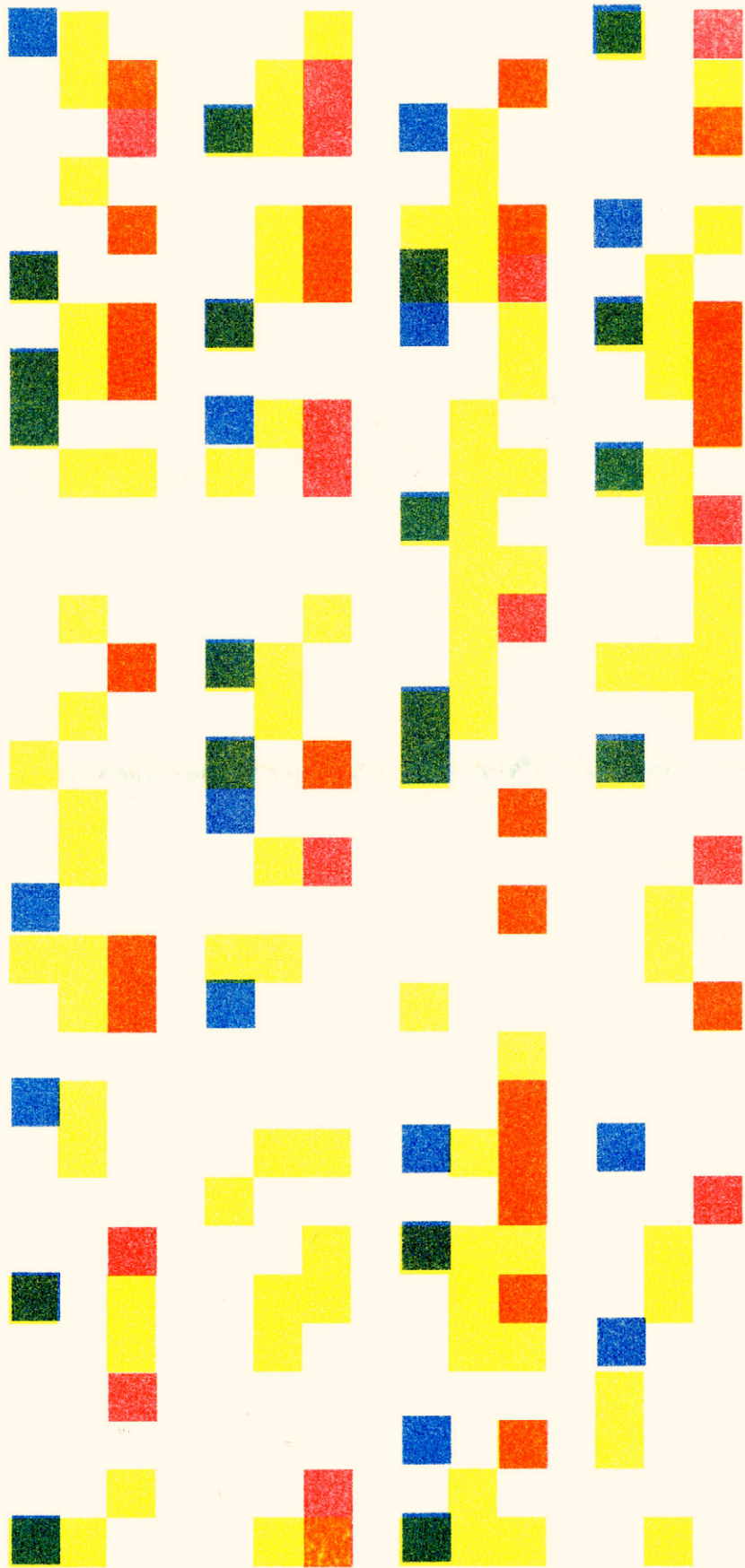
Message: job is succeeded

Raw Per-Shot Measurement Data of
the 3-Qubit Aesthetic Circuit (128 Shots) 250711

Job ID: 06870765-12c8-7748-8000-ac2a4f3aa979
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 128
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 11:26:25
Ready at: 07/11/2025 11:26:31
Running at: 07/11/2025 11:26:31
Ended at: 07/11/2025 11:26:33
Execution time (sec): 1.449
Message: job is succeeded

スケーラブル美的量子回路の測定時に得られた、各ショットごとのビット列 (生データ) を、測定順に並べたもの。美的状態の影。

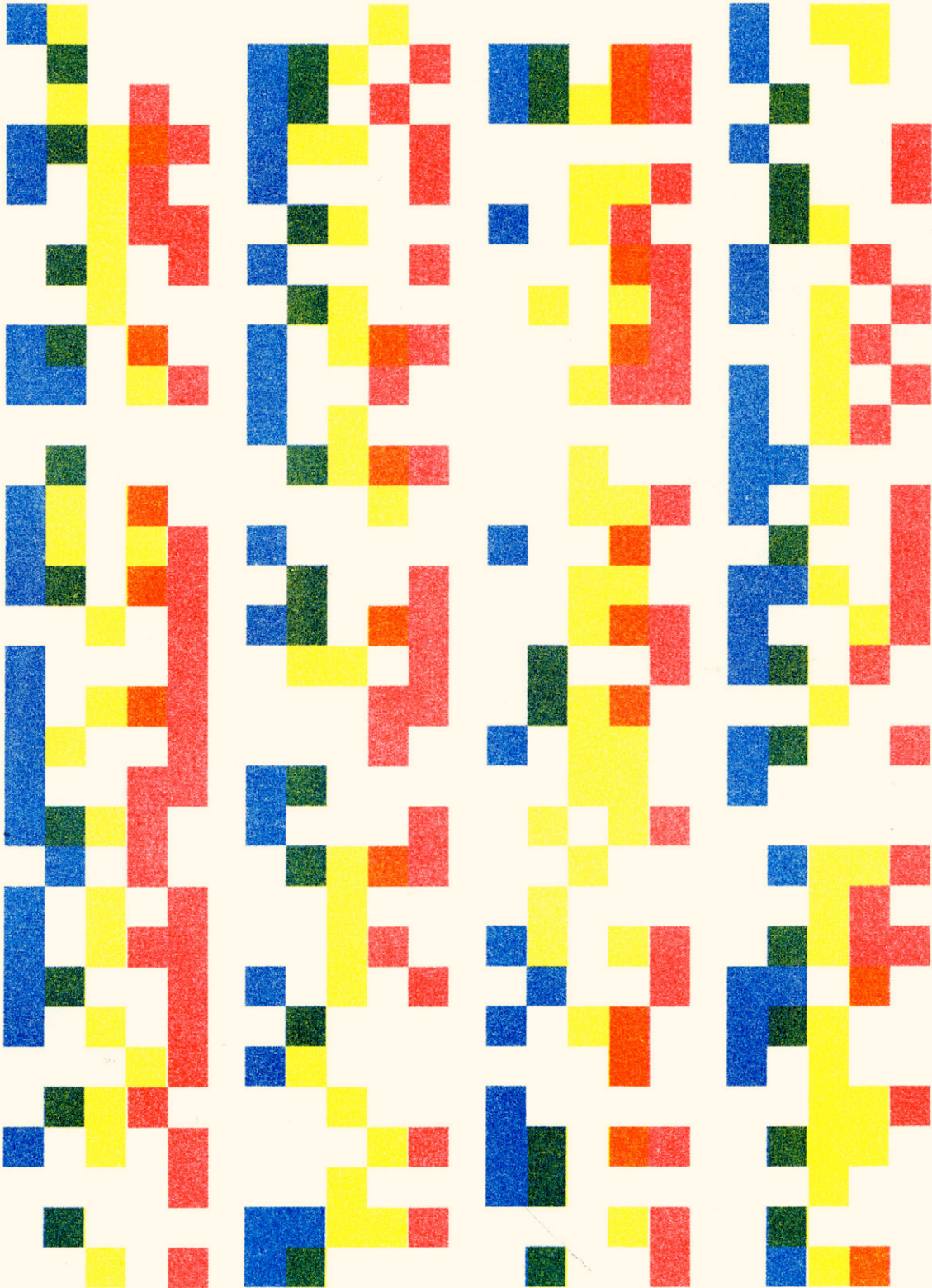
Sequential listings of raw bit strings obtained from each shot during measurements of scalable aesthetic quantum circuits. Shadows of the aesthetic states.



Raw Per-Shot Measurement Data of
the 5-Qubit Aesthetic Circuit (128 Shots) 250711

xvii

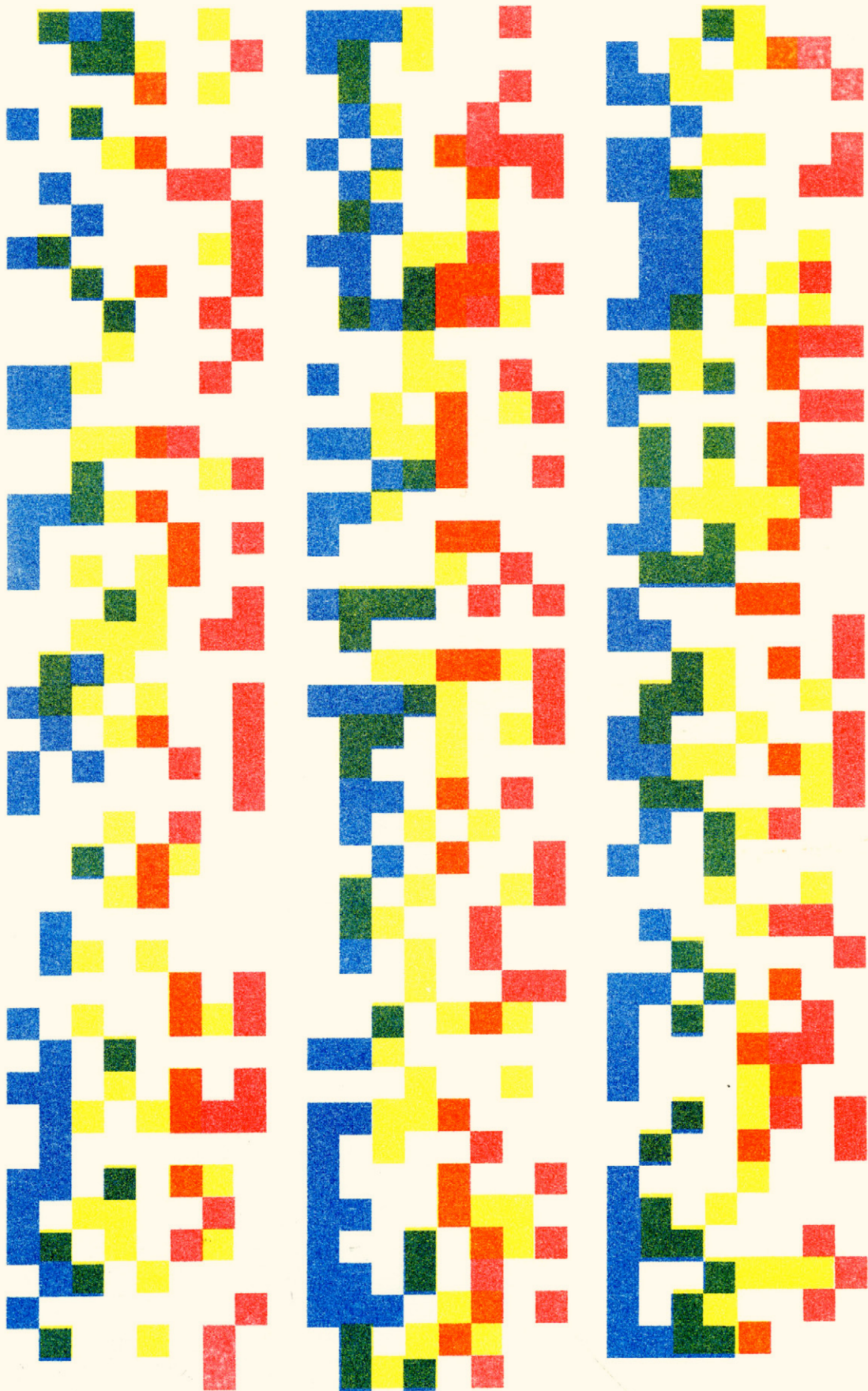
Job ID: 06870767-7d2f-701e-8000-f1b3a87aa41f
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 128
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 11:27:04
Ready at: 07/11/2025 11:27:11
Running at: 07/11/2025 11:27:11
Ended at: 07/11/2025 11:27:13
Execution time (sec): 1.726
Message: job is succeeded

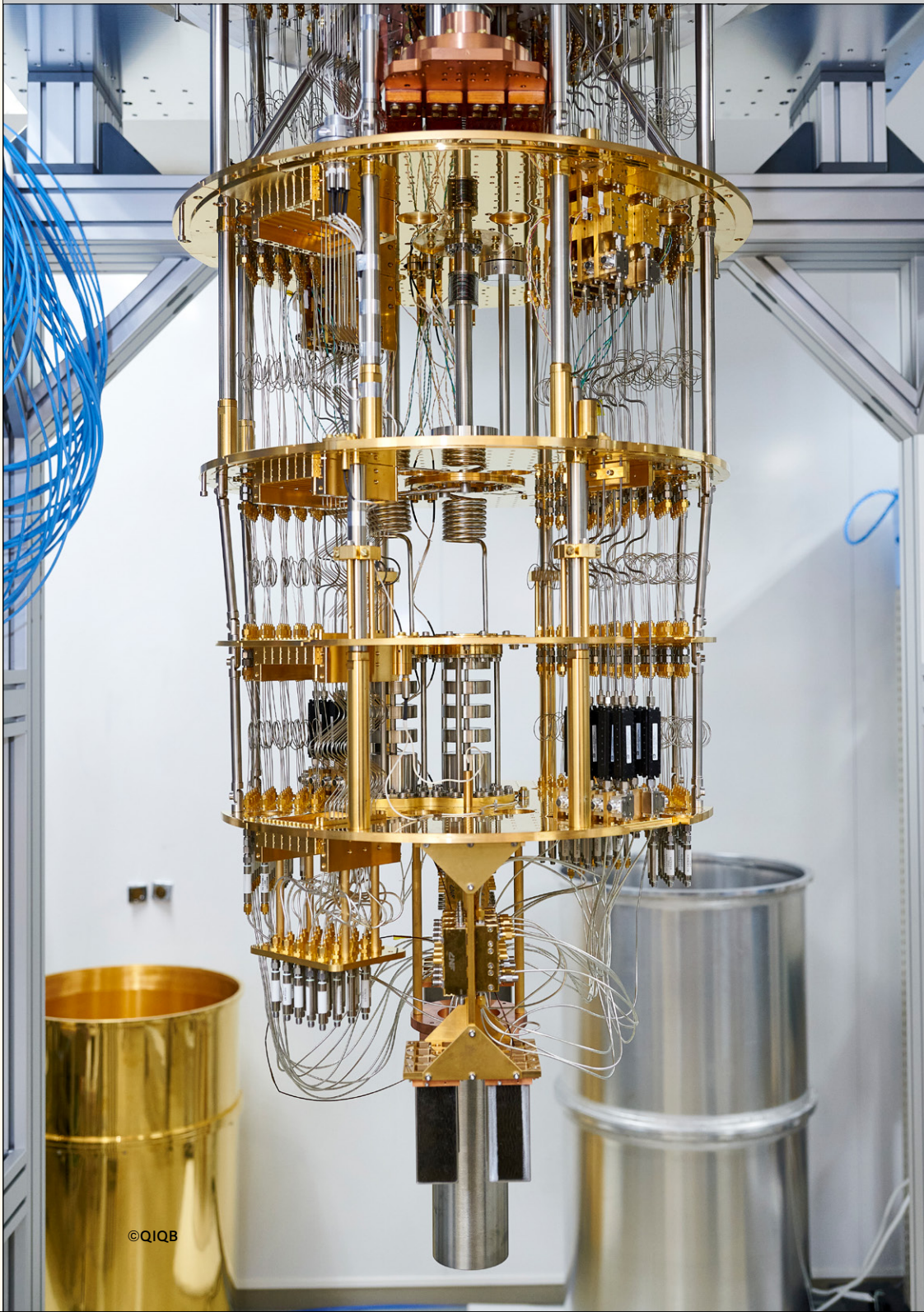


Raw Per-Shot Measurement Data of
the 8-Qubit Aesthetic Circuit (128 Shots) 250711

xviii

Job ID: 06870769-df9f-79e0-8000-f91693163136
Job type: sampling
Device ID: anemone
Number of shots: 128
Status: succeeded
Submitted at: 07/11/2025 11:27:42
Ready at: 07/11/2025 11:27:51
Running at: 07/11/2025 11:27:51
Ended at: 07/11/2025 11:27:53
Execution time (sec): 1.924
Message: job is succeeded





Heart 250711, Raw Per-Shot Measurement Data

Job ID: 0687066b-728d-797f-8000-2c797b55966a

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/11/2025 10:19:51

Ready at: 07/11/2025 10:20:01

Running at: 07/11/2025 10:20:01

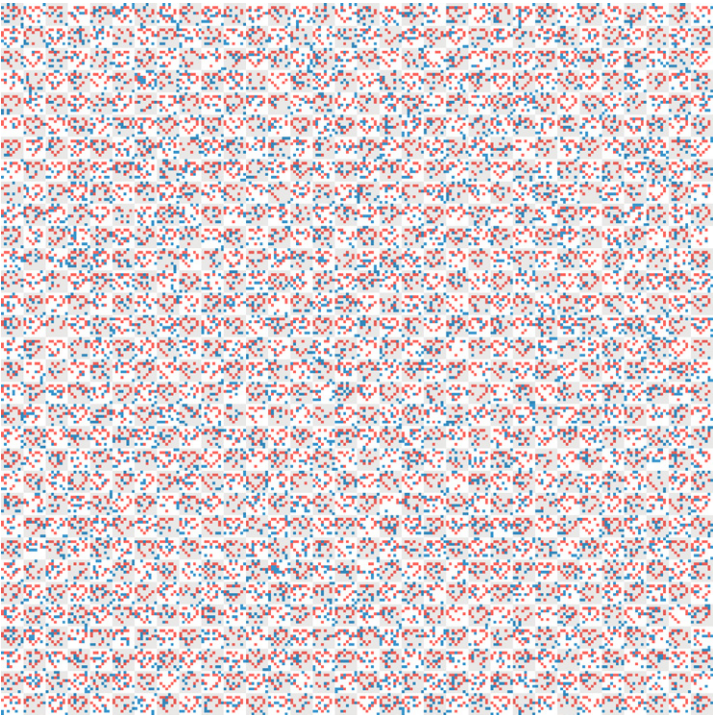
Ended at: 07/11/2025 10:20:13

Execution time (sec): 11.303

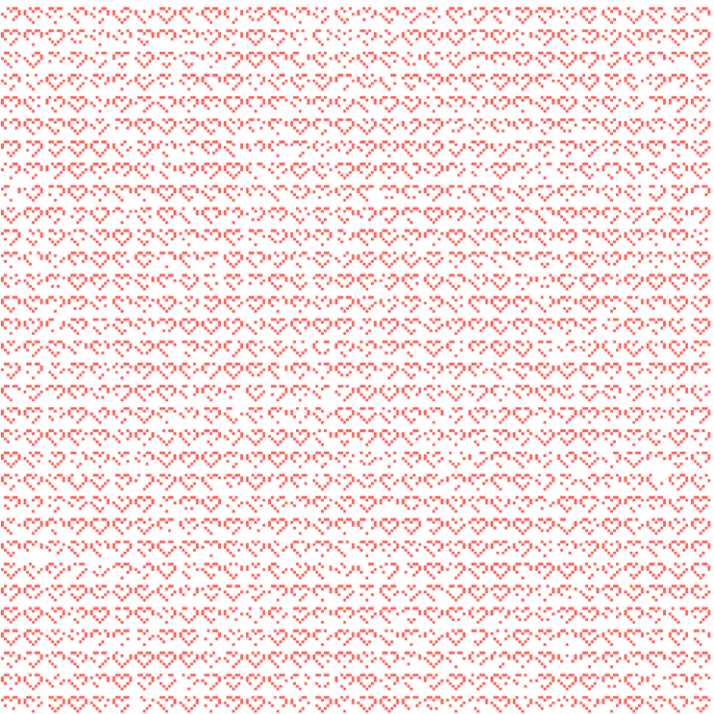
Message: job is succeeded

これまで、多数のショットを統計的に重ね合わせることで、そこから像を浮かび上がらせてきた。ここからは、多数のショットを並置することで、測定結果全体を俯瞰してみる。

1024回のショットごとの測定結果を実行順に並べたもの。それぞれのビットマップを区別しやすくするために、背景を灰色と白色のチェックにした。赤のピクセルがハート型のターゲット量子ビットで、青のピクセルはそれ以外の量子ビットに対応している。



ターゲット量子ビットだけを抜き出して表示したもの。



Entangled komyaku 250718

Job ID: 06879b48-27a8-78a0-8000-74dad74cb702

Job type; sampling

Device ID; anemone

Number of shots; 1024

Status; succeeded

Submitted at; 07/18/2025 11:42:10

Ready at; 07/18/2025 11:42:13

Running at; 07/18/2025 11:42:14

Ended at; 07/18/2025 11:42:16

Execution time (sec); 2.000

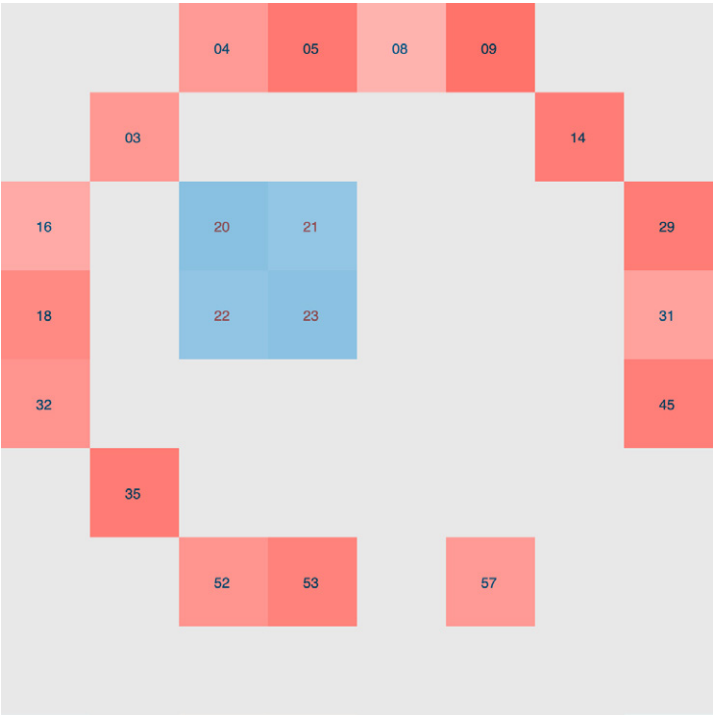
Message: job is succeeded

QASM3コード(抜粋)

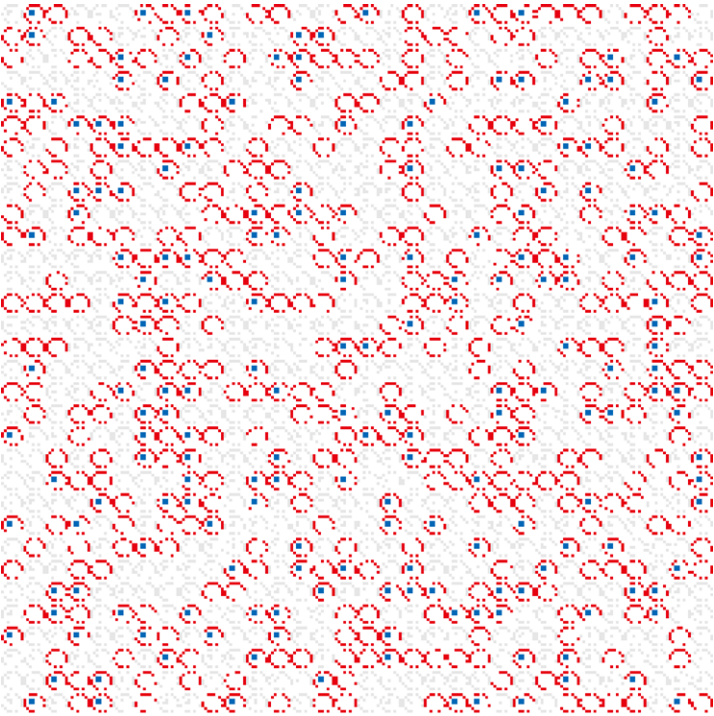
```
r_qubits = [3, 4, 5, 8, 9, 14, 16, 18, 29, 31, 32, 35, 45, 52, 53, 57]
m_qubits = [3, 4, 5, 8, 9, 14, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 29, 31, 32, 35, 45, 52, 53, 57]
n = 64
circuit = QuantumCircuit(n, n)
for i in r_qubits:
    circuit.x(i)
circuit.sx(20)
circuit.cx(20, 21)
circuit.cx(20, 22)
circuit.cx(22, 23)
for i in m_qubits:
    circuit.measure(i, i)
```

量子もつれによってビットマップを構造的に結合する。青のピクセルで表示された20～23の量子ビットがもつれている。赤のピクセルはビット反転のみ。

量子ビットをエンタングルさせても、1024回のショットを重ね合わせてしまえば、普通のグレースケール画像には見えない。



1024回のショットごとの測定結果を実行順に並べたもの。エンタングルした4つの量子ビットがすべて1あるいは0になったピクセルだけ表示し、それ以外はグレイアウトしている。もつれ合ったピクセルがすべて1になったショットが198回、すべて0になったショットが309回であった。



Entangled Human 250711

Job ID: 068707e3-4cfe-7da8-8000-e0bcbea5e70f

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/11/2025 12:00:05

Ready at: 07/11/2025 12:00:11

Running at: 07/11/2025 12:00:11

Ended at: 07/11/2025 12:00:23

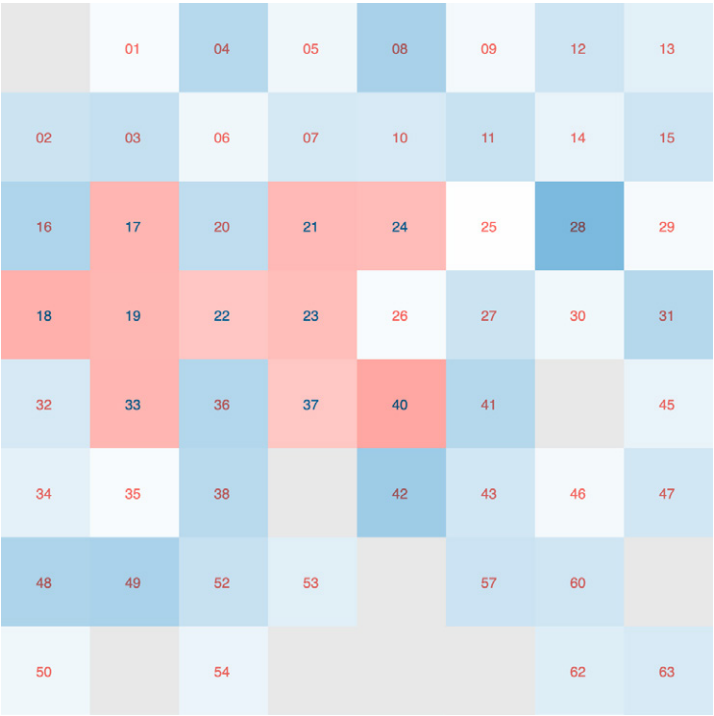
Execution time (sec): 11.444

Message: job is succeeded

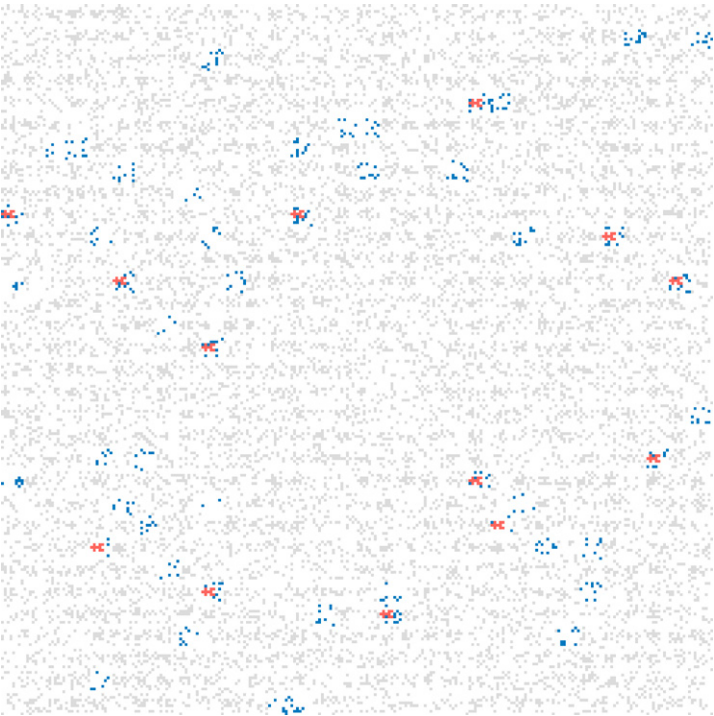
QASM3コード(抜粋)

```
available_qubits = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 57, 60, 62, 63]
n = 64
circuit = QuantumCircuit(n, n)
circuit.sx(22)
circuit.cx(22, 19)
circuit.cx(19, 17)
circuit.cx(19, 18)
circuit.cx(19, 33)
circuit.cx(22, 23)
circuit.cx(23, 21)
circuit.cx(21, 24)
circuit.cx(23, 37)
circuit.cx(37, 40)
for i in available_qubits:
    circuit.measure(i, i)
```

人型に配置した10個のターゲット量子ビット(赤のピクセル)をすべてもつれさせてから、使用できるすべての量子ビットを測定した(赤と青のピクセル)。



1024回のショットごとの測定結果を実行順に並べたもの。エンタングルした10個の量子ビットがすべて1あるいは0になったピクセルだけ表示し、それ以外はグレイアウトしている。もつれ合ったピクセルがすべて1になったショットが13回、すべて0になったショットが38回であった。



Entangled Tetris Pieces 250718 (Case 1)

Job ID: 06879bcf-91a4-70ec-8000-0efcc330f7b8

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/18/2025 12:18:17

Ready at: 07/18/2025 12:18:24

Running at: 07/18/2025 12:18:24

Ended at: 07/18/2025 12:18:26

Execution time (sec): 1.754

Message: job is succeeded

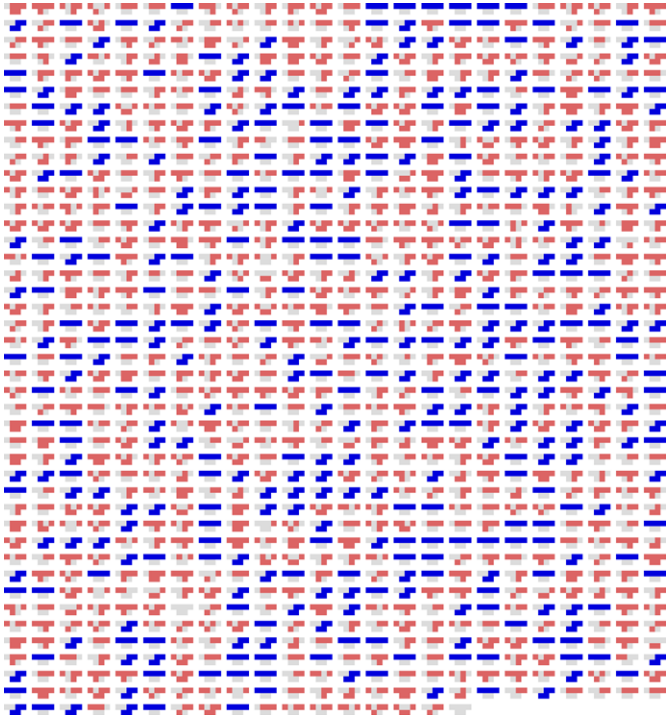
Qulacsコード (抜粋)

```
n = 6
circuit = QuantumCircuit(n)
circuit.add_X_gate(2)
circuit.add_X_gate(3)
circuit.add_H_gate(0)
circuit.add_CNOT_gate(0, 1)
circuit.add_CNOT_gate(1, 4)
circuit.add_CNOT_gate(4, 5)
circuit.add_X_gate(4)
circuit.add_X_gate(5)
```

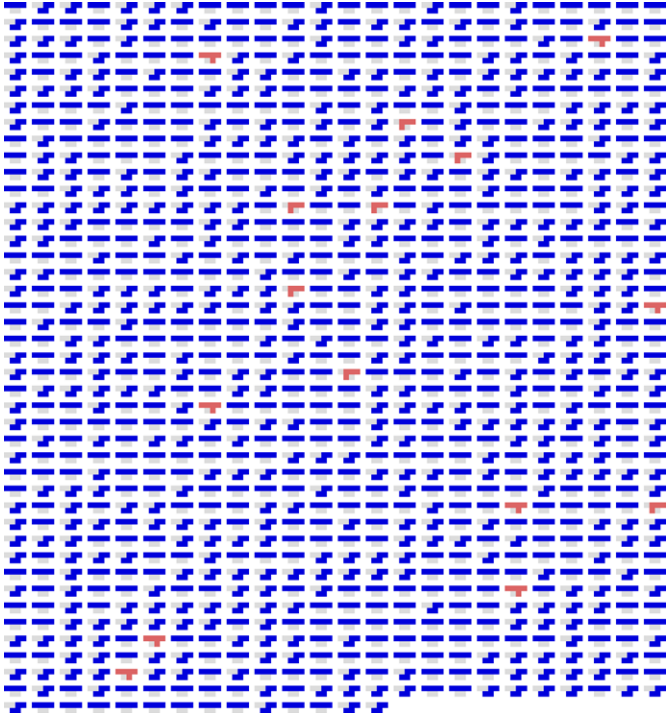
5	4	3	2
	1	0	

6つの量子ビットをエンタングルさせて、2つの形が重なった量子的なテトリスピースを表現する。量子ビットのインデックスとテトリスピースの配置は以下のように対応している。

1024回のショットごとの測定結果を実行順に並べたもの。想定した2種類のテトリスピースのいずれかになったものを青色で表示し、それ以外の結果は赤色で表示されている。青色のピースは372個。



測定結果に対して、誤差モデルに基づくミティゲーション(ノイズ推定および補正)を適用した後の推定値。青色のピースは1007個になった。



Entangled Tetris Pieces 250718 (Case 2)

Job ID: 06879bdf-391b-732c-8000-4ea13d5ea8c4

Job type: sampling

Device ID: anemone

Number of shots: 1024

Status: succeeded

Submitted at: 07/18/2025 12:22:28

Ready at: 07/18/2025 12:22:33

Running at: 07/18/2025 12:22:34

Ended at: 07/18/2025 12:22:36

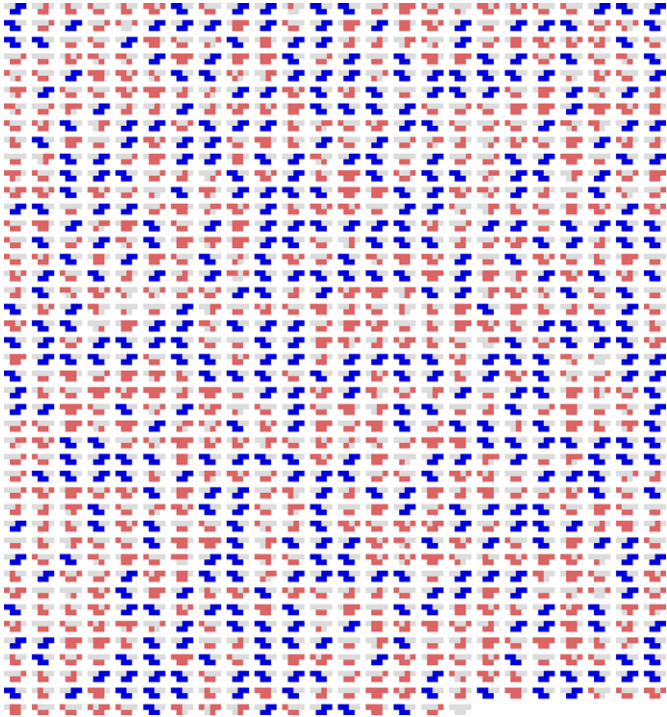
Execution time (sec): 1.711

Message: job is succeeded

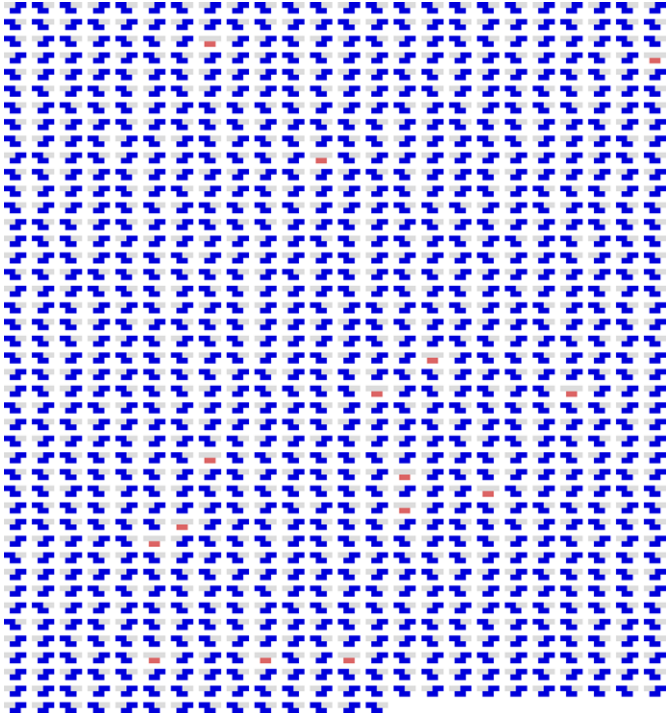
Qulacsコード (抜粋)

```
n = 6
circuit = QuantumCircuit(n)
circuit.add_X_gate(0)
circuit.add_X_gate(1)
circuit.add_H_gate(5)
circuit.add_CNOT_gate(5, 2)
circuit.add_CNOT_gate(2, 3)
circuit.add_CNOT_gate(5, 4)
circuit.add_X_gate(4)
circuit.add_X_gate(5)
```

1024回のショットごとの測定結果を実行順に並べたもの。想定した2種類のテトリスピースのいずれかになったものを青色で表示し、それ以外の結果は赤色で表示されている。青色のピースは434個。



測定結果に対して、誤差モデルに基づくミティゲーションを適用した後の推定値。青色のピースは1007個になった。



謝辞

Acknowledgments

本展示および冊子制作を進めるにあたっては、さまざまな関係者の方々に、多大な協力をいただきました。特に、量子コンピュータの実機を十二分に使用させていただいた、大阪大学 量子情報・量子生命研究センター副センター長の根末誠さん、そして直接の技術的指導と親身なサポートをいただいた宮永崇史さんの協力なしには、この芸術的挑戦は成し得ませんでした。そしてこの数ヶ月の試行錯誤の結果を、見事に洗練された冊子にまとめていただいた、そしてリソグラフという物質性と個別性の高いメディアを使うことを提案していただいたデザイナーの畑ユリエさん、とっちらかった原稿や図版を丁寧に整理していただいた編集の後藤知佳さんにも、深く感謝したいと思います。さらにCG-ARTSの筋貴彦さんの尽力のおかげで、大阪万博というカオスのような場での展示が、何とか可能になりました。

最後に、この「エンタングル・モーメント」展全体を企画していただいた、文部科学省 量子研究推進室のみなさん、そしてプロデューサーチームのみなさんをはじめとする、関係各位にも厚く御礼を申し上げます。本当にありがとうございました。

執筆・画像	久保田晃弘
	Akihiro Kubota
協力	大阪大学 量子情報・量子生命研究センター(QIQB)
	根末 誠・宮永崇史
	Center for Quantum Information and Quantum Biology,
	The University of Osaka
	Makoto Negoro, Takafumi Miyanaga
	
デザイン	畑ユリエ
	Yurie Hata
編集	後藤知佳
	Chika Goto
展示企画制作	筋 貴彦・畑ユリエ・後藤知佳
	Takahiko Azami, Yurie Hata, Chika Goto
リソグラフ印刷	Hand Saw Press

Appendix

Health Measure of Quantum Bits

巻末付録

量子ビットの健康測度

量子チップ上にグリッド上に配置された各量子ビットの健全性を示す指標として、健康測度 (Health Measure, HM) を導入した。具体的には、次の式で定義される。

健康測度 (HM): $HM = (\min(T_1, T_2^{echo}) / t_{gate}) \cdot F_{readout}$

T_1 : 縦緩和時間 (エネルギー寿命、励起状態がどれだけ長く保たれるか)

T_2^{echo} : 横緩和時間 (重ね合わせ状態の維持時間、エコー測定による値)

t_{gate} : ゲート持続時間 ($1 / (2 * \text{rabi frequency})$), 基本操作に必要な時間)

$F_{readout}$: 読み出し忠実度 (正しい測定結果が得られる確率)

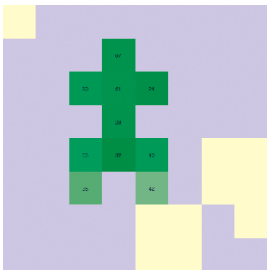
この健康測度は、「量子ビットがデコヒーレンスを起こす前に、どれだけ多くの特性ゲート操作を実行できるか」(=緩和時間をラビ振動周期で正規化したもの) を表す操作律速性能指数に、読み出しの忠実度を乗じること、直感的かつ物理的に量子ビットの健全性を示している。

次ページ以降の図は、日々のキャリブレーションデータから各量子ビットの健康測度を求めて、カラーピクセル表示したものである。健康測度の値に応じてピクセルの色 (0: 赤 ~ 500: 緑) が変化する。

May 19, 2025

Number of available qubits:
11 (per job submission)

Image on This Day:
-Human 250519 (xv)

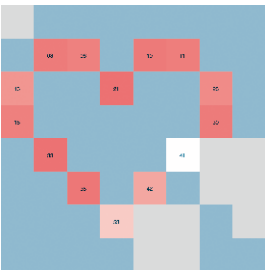


—	206.1	270.9	130.7	16.3	227.2	—	—
239.4	481.4	155.7	357.8	112.8	238.8	—	—
43.8	95.1	303.4	145.6	419.6	132.1	186.0	184.9
310.1	246.6	182.7	69.4	182.1	237.6	424.8	210.9
111.6	202.3	395.8	285.4	—	—	—	—
236.3	227.2	348.4	—	—	—	—	—
68.2	59.7	295.3	291.6	—	312.8	—	—
172.2	—	85.1	1.9	—	—	—	—

May 28, 2025

Number of available qubits:
54 (tentative)

Image on This Day:
-Heart 250528 (xiv)

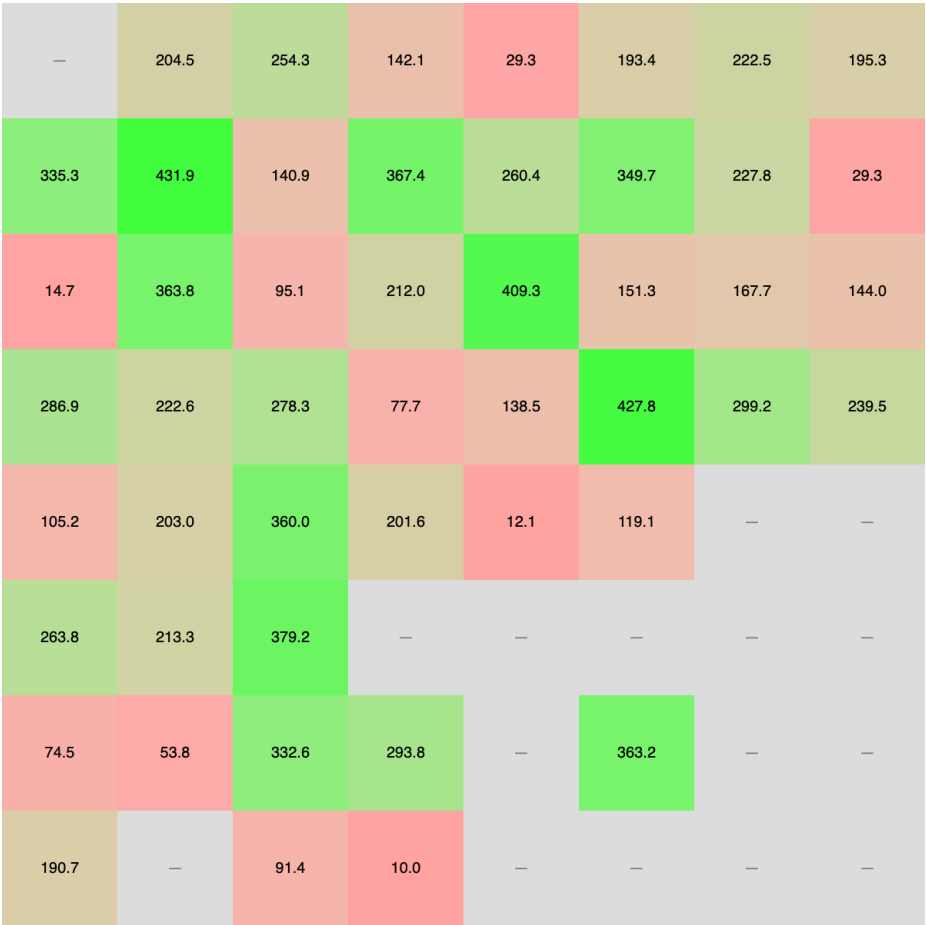
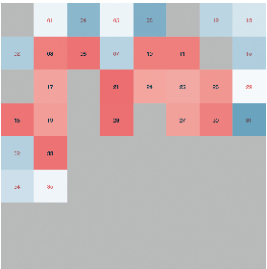


—	210.5	263.4	130.3	25.0	139.5	277.3	207.2
298.6	495.9	135.1	354.1	252.1	338.8	237.7	28.3
34.8	317.9	346.2	35.2	364.7	112.7	203.1	155.3
304.7	269.0	205.9	92.9	132.6	295.3	407.5	238.6
102.5	209.9	443.6	268.0	12.1	119.1	—	—
260.8	213.8	457.5	—	—	—	—	—
86.2	73.6	189.4	395.1	—	309.0	—	—
181.1	—	91.5	10.0	—	—	—	—

June 6, 2025

Number of available qubits:
29

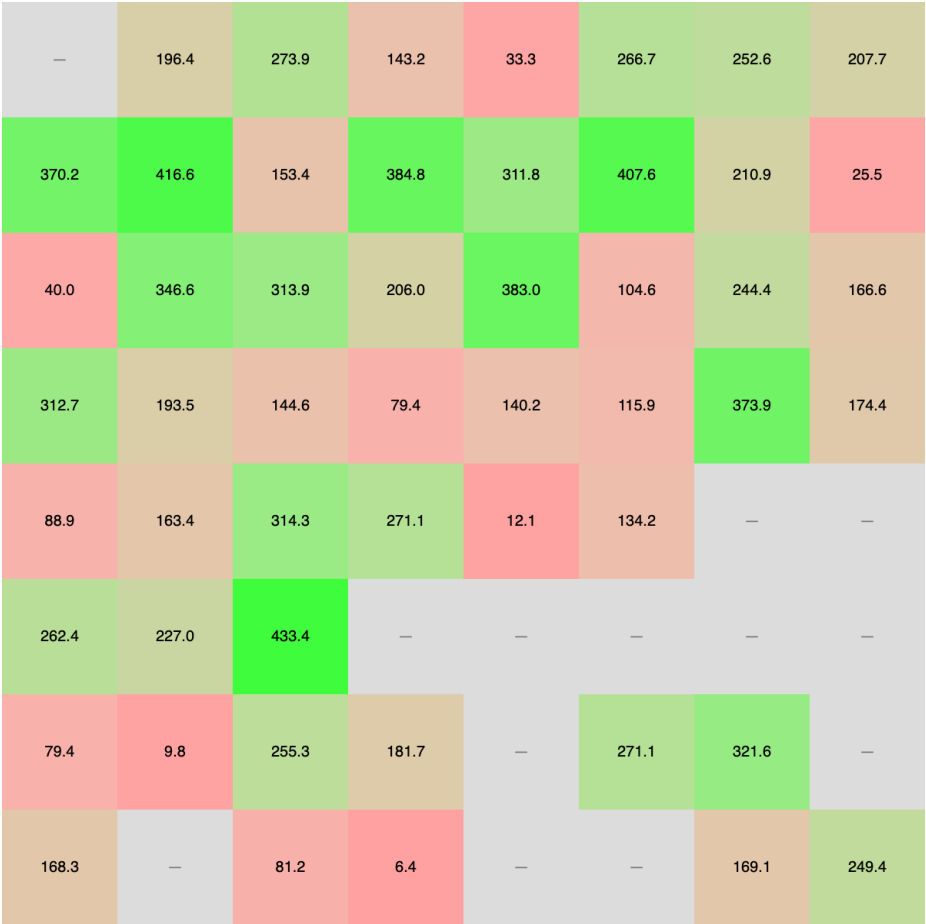
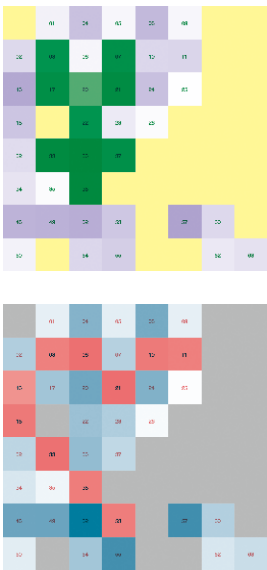
Image on This Day:
-Heart filled with Superposition
250606 (xiii)



June 13, 2025

Number of available qubits:
39

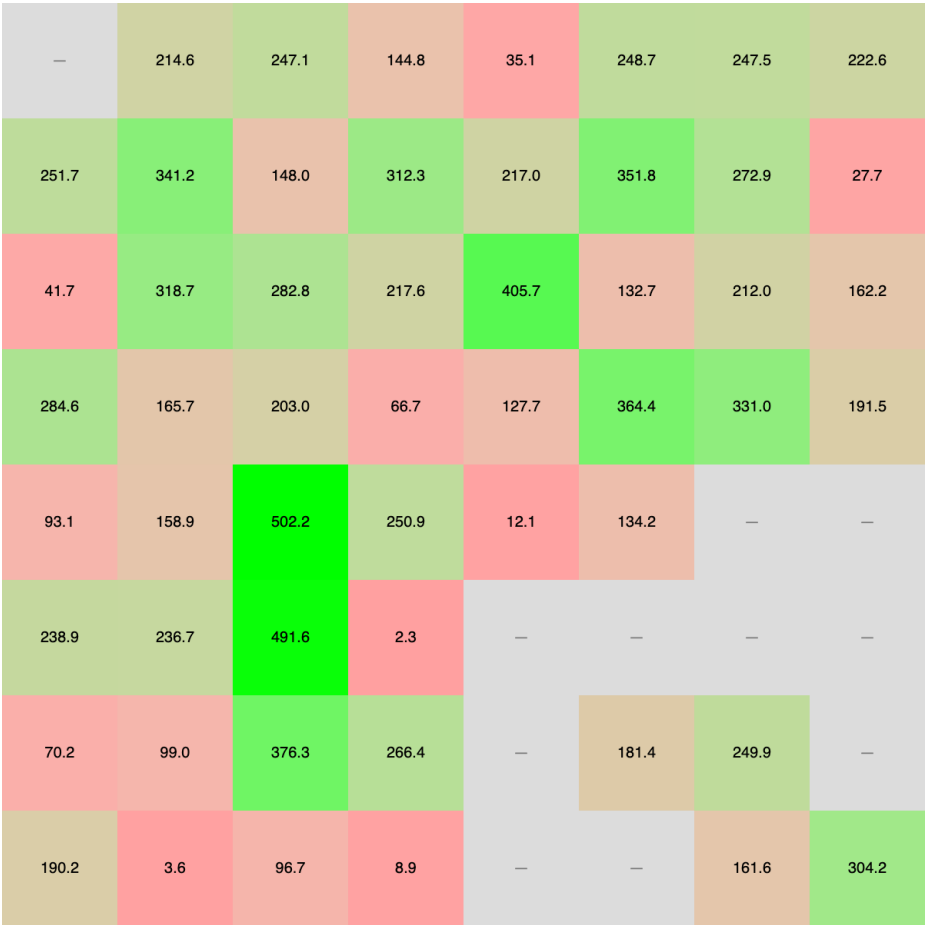
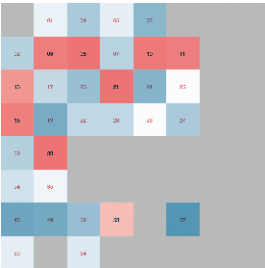
Images on This Day:
-Headstand Human 250613 (xi)
-Heart 250613 (xii)



June 27, 2025

Number of available qubits:
33

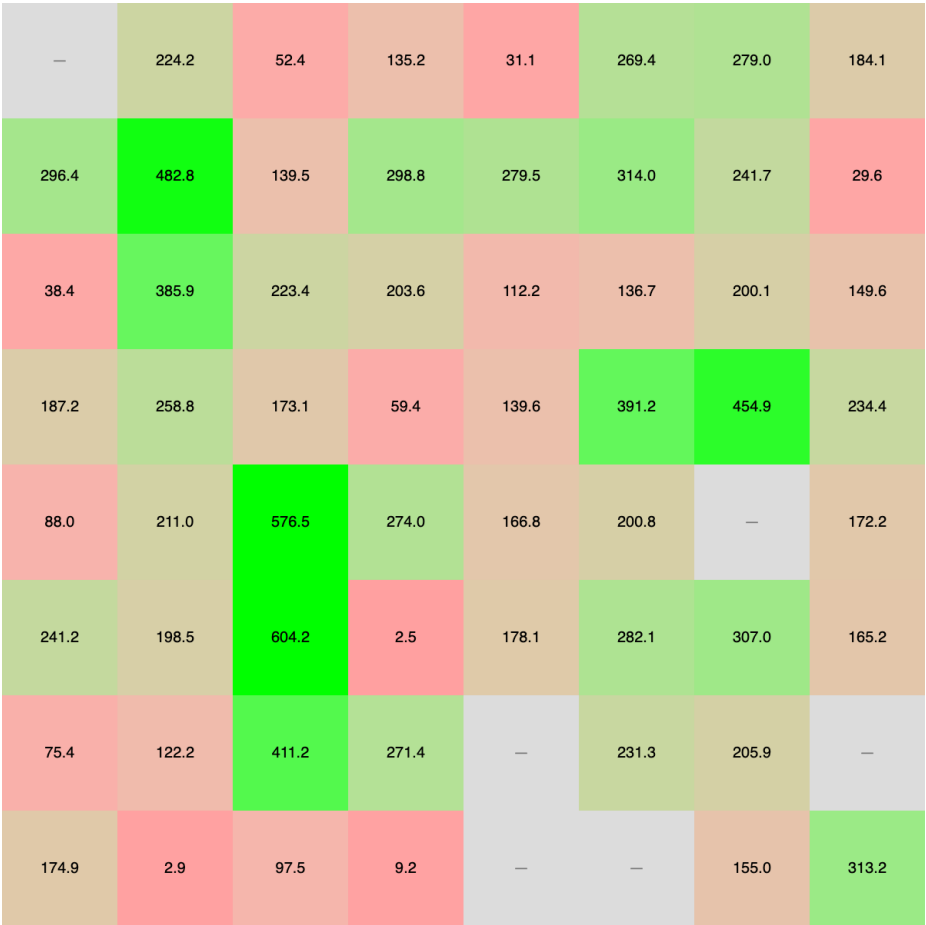
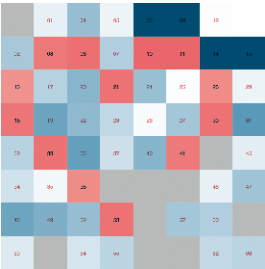
Image on This Day:
-Heart 250627 (x)



July 4, 2025

Number of available qubits:
54

Image on This Day:
-Heart 250704 (ix)

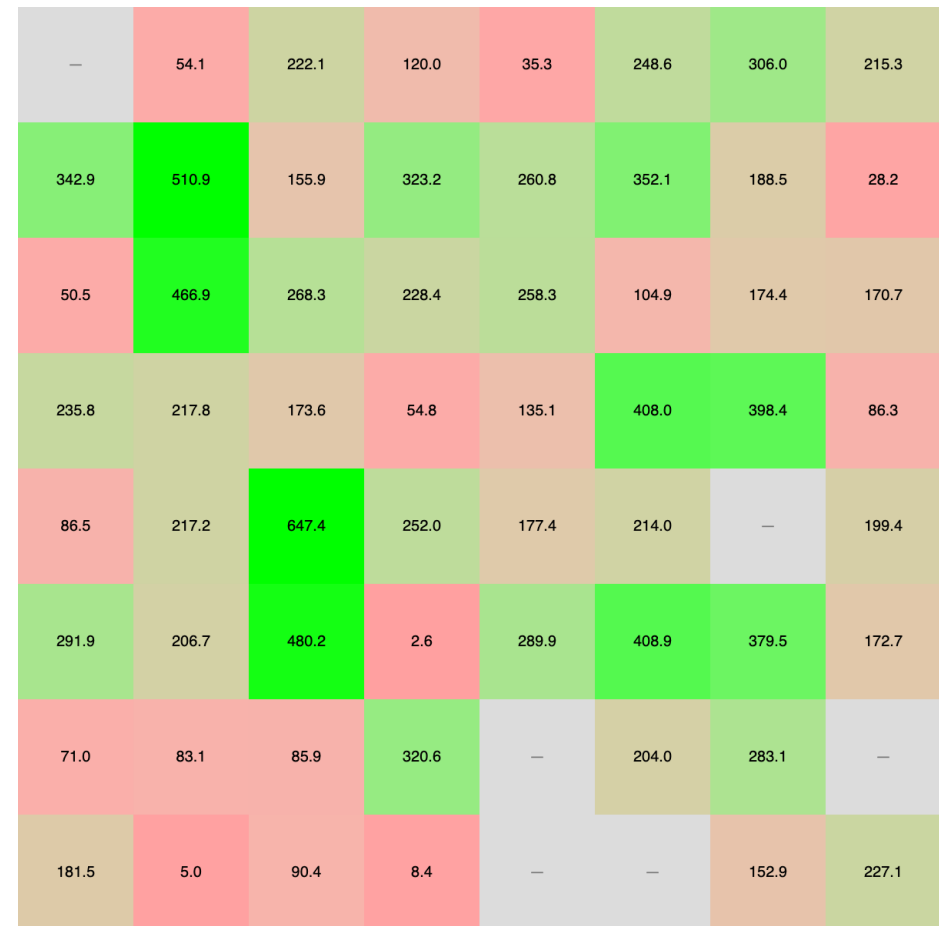
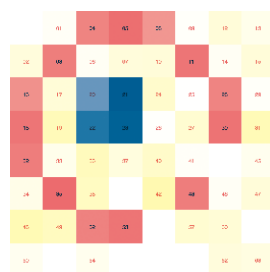
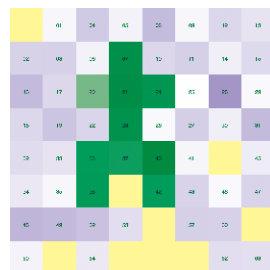
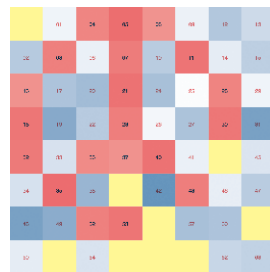
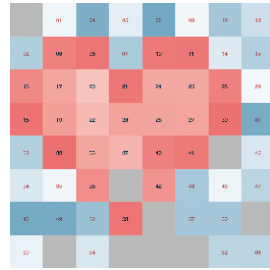
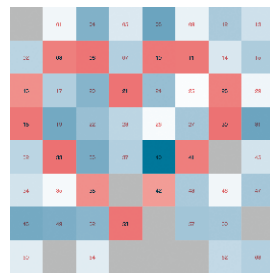


July 11, 2025

Number of available qubits:
55

Images on This Day:

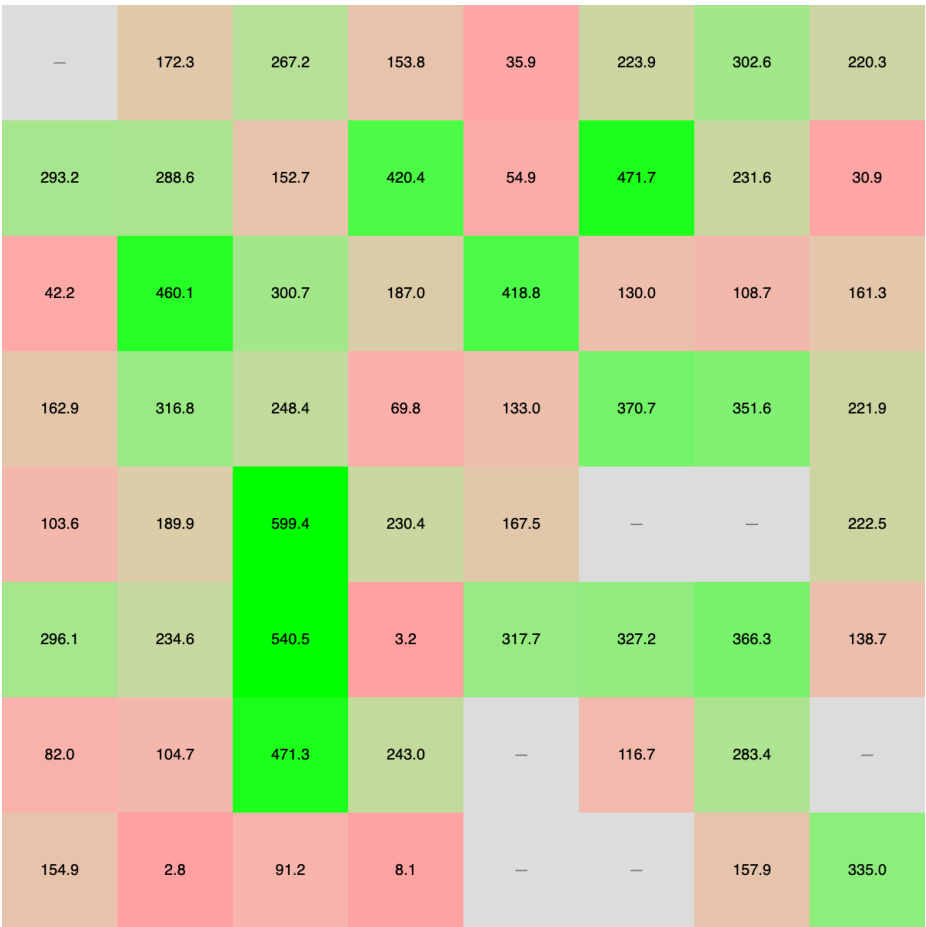
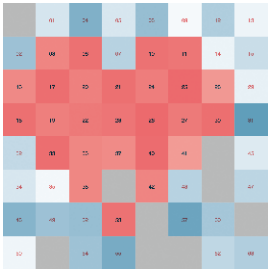
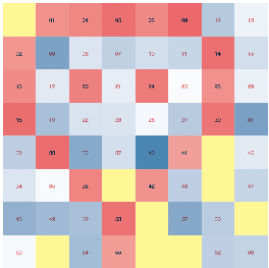
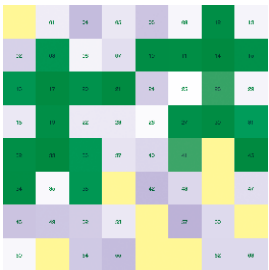
- Heart 250711 (iv)
- Heart filled with
Superposition 250711 (v)
- Peace 250711 (vi)
- Human 250711 (vii)
- Something like Komyaku
250711 (viii)
- Raw Per-Shot Measurement
Data of the 3-Qubit Aesthetic
Circuit (128 Shots)
250711 (xvi)
- Raw Per-Shot Measurement
Data of the 5-Qubit Aesthetic
Circuit (128 Shots)
250711 (xvii)
- Raw Per-Shot Measurement
Data of the 8-Qubit
Aesthetic Circuit (128 Shots)
250711 (xviii)



July 18, 2025

Number of available qubits:
55

- Images on This Day:
- Two Humans 250718 (i)
 - Headstand Slime 250718 (ii)
 - Full Heart 250718 (iii)



Quantum Computer Art Studies

知覚できないものの美学と多数性の詩学

久保田晃弘 + QIQB

p.02 1. Quantum Computers and Art

量子コンピュータとアート

p.08 2. Quantum Information Aesthetics

量子情報美学

p.22 3. The Poetics of Multiplicity

多数性の詩学

p.30 4. Quantum Chip Bitmap

量子チップビットマップ

p.45 Acknowledgments

謝辞

p.46 Appendix:
Health Measure of Quantum Bits

巻末付録: 量子ビットの健康測度