

知っておきたいキーワード

量子画像表現

福嶋慶繁[†][†]名古屋工業大学 工学部 情報工学科

"Quantum Image Representation" by Norishige Fukushima (Nagoya Institute of Technology, Aichi)

キーワード：量子画像表現, qubit lattice, QPIE, FRQI, NEQR

1. まえがき

量子コンピュータによる画像処理はどう実現するのでしょうか？ 本稿では、RGBインタリーブやYUV420などの従来の画像フォーマットの量子コン

ピュータ版に相当する量子画像表現について説明します。特に、Qubit Lattice¹⁾、QPIE (Quantum Probability Image Encoding)²⁾、FRQI (Flexible Representation of Quantum Images)³⁾、NEQR (Novel Enhanced Quantum

Representation)⁴⁾の四つを、 2×2 画像と測定ヒストグラムの対応から直感的に説明し、量子ビット数、読出しやすさ、用途の違いを整理します。

2. 量子コンピュータと量子画像表現

量子コンピュータは次世代の高性能計算機として期待されています。古典コンピュータの0と1で表されるビットと異なり、量子コンピュータは0と1の重ね合わせを持つ量子ビットを計算の基本単位とします。また、計算は古典コンピュータの論理ゲートに対応する量子ゲートに量子ビットを通すことで実現します。そして、量子ビット

に情報を重ね合わせることで多数の状態を単一量子ゲート群に通し、並列計算を実現します。

この量子コンピュータを用いて画像処理の並列計算を行うためには量子画像表現が重要です。量子画像表現とは、画像の座標と画素値を量子状態のどこへ載せるかを定める枠組みです。量子計算では、座標を基底状態で持つのか、明るさを振幅で持つのか、あるいはビット列で持つのかを選ばなければなりません。したがって表現方式の違い

は、何が読みやすいか、何が処理しやすいかの違いになります。

本稿では四つの代表的な量子画像表現を例にして説明します。Qubit Latticeは各画素に1量子ビットを割り当てる最も素朴な方式です。QPIEは画素値を正規化振幅へ直接埋め込みます。FRQIは座標と明るさを分け、NEQRはその明るさを2進ビット列として持ちます。

3. 各量子画像表現の詳細

2×2の8ビット4画素は、古典コンピュータでは32ビットで表現でき、最大値は2³²-1で約43億です。一方、量子ビットは確率をアナログ量として保持することができ、一つの量子ビットに2³²の分解能で確率情報を保持すれば、原理上はこの画像を保存できます。しかし量子ビットに保持された確率は、計測時、すなわち古典コンピュータに戻すときに必ず0か1の二値に収束します。もし連続の確率値が欲しい場合は複数回同じ処理を行うことで統計的に確率を復元する必要があります。この場合、22億/43億という確率に正確に収束するまでの膨大な計測を必要とし、たった4画素を計算するのに最良でも43億回の繰り返しを必要とします。さらに、この表現では各画素を処理する演算子を定義することが難しいです。本稿で紹介する量子画像表現は、これらの問題を解決するための画像を量子状態にエンコードする手段です。以下では図1に示す画像の各量子画像表現と、その量子ビット列を計測したヒストグラムから画像復元する流れを説明します。

Qubit Latticeは最も直感的です。2×2画像を構成する4画素を、左上、右上、左下、右下の量子ビットに対応づけ、各画素値に確率を割り当てます。つまり、各量子ビットを複数回計測して確率を復元すれば画像に戻ります。また、最大値255であれば2³²回よりも圧倒的に少ない計測回数で戻ります。ただし、2^m×2^m画像では2^{2m}個の量子ビットが必要になり、大きな画

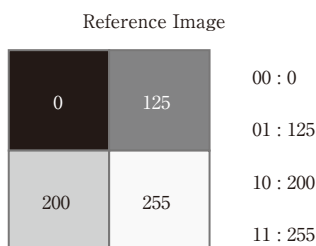


図1 入力画像

像には不利です。また、各画素が重ね合わせの状態にない、つまり各量子ビットを個々に量子ゲートに通す必要があります。量子コンピュータが持つ並列性を生かし切れません。図2にQubit Latticeの計測ヒストグラムを示します。各量子ビットを計測して1が出る確率から各画素が復元できます。

QPIEは2量子ビットで表現します。量子ビット列が表す四つの基底状態|00>, |01>, |10>, |11>の振幅へ画素値の総和が1となるように正規化した確率を埋め込みます。2×2画像の量子状態|I>は

$$|I\rangle = c_{00}|00\rangle + c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle + c_{11}|11\rangle$$

と書けます。ここで係数は

$$c_{yx} = \frac{I_{yx}}{\sqrt{\sum I^2}}$$

であり、計測すると画素値が取り出せるように設定されています。また、|00>は基底状態のブラケット表記であり、この場合は二つの量子ビットの組み合わせが00となる状態を指します。QPIEは、一般に2^m×2^m画像を2^m量子ビットだけで表せます。一方、一度の測定で得られるのは4画素中のどこか1画素に対応する結果であるため、読出しには多数回測定が必要です。

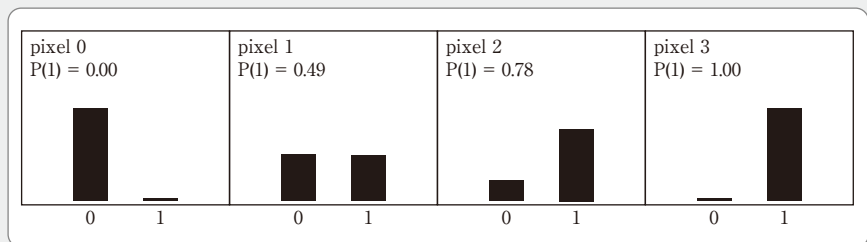


図2 Qubit Lattice

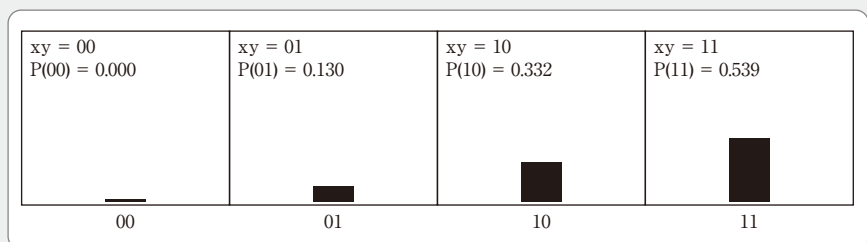


図3 QPIE

図3にQPIEの計測ヒストグラムを示します。一度の計測で二つの量子ビットが00, 01, 10, 11の4通りのパターンで登場し、そのパターンの登場頻度を計測回数で正規化した確率から各画素値を求められます。

FRQIはQPIEより画像処理向けに構造化された表現です。一般に2^m+1量子ビットを用い、2^m個の座標量子ビットで全画素位置を重ね合わせ、さらに1個の色量子ビットの回転角で明るさを表します。追加の輝度量子ビットのおかげで明るさ変換や幾何変換を全座標へ一括適用しやすいです。式で書けば、

$$|I\rangle = \frac{1}{2^m} \sum_i (\cos(\theta_i)|0\rangle + \sin(\theta_i)|1\rangle) \otimes |i\rangle$$

となります。ここで|i>は|00>, ..., |11>をiの添え字表現をしたもの、画素座標、θ_iは画素値から決まる角度です。ただし、明るさは振幅に入っているため、ここでも画素値の復元には複数回の計測が必要です。図4にFRQIの計測ヒストグラムを示します。QPIEと対比すると、各位置の00, 01, 10, 11は等確率に登場し、追加の輝度量子ビットが1になる確率で画素値を表現します。Qubit Latticeの計測ヒストグラムと同じ形をしています。

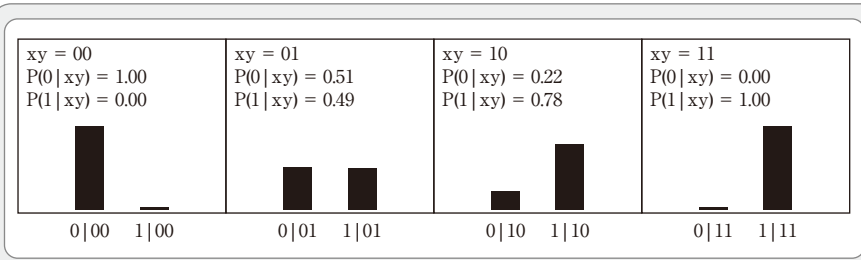


図4 FRQI

計測される量子ビットは三つであり、輝度・位置の順で表される000から111のビット列のヒストグラムから画像を復元します。例えば右上の画素であれば、ビット列001と101の頻度の総和に対する、ビット列101の頻度から確率を求めて輝度に変換します。一度の計測で1画素の確率復元1回分しか観測できないため多量の計測が必要となります。

NEQRは、FRQIの読出しにくさを補うために、明るさを振幅ではなく2進数の基底状態として保持します。2×2画像で画素値が0, 125, 200, 255なら、座標まで含めたビット列は00000000|00, 01111101|01, 11001000|10, 11111111|11です。見やすいように輝度と位置の量

子ビットの境に|をセパレータとして記載しています。状態は

$$|I\rangle = \frac{1}{2^m} \sum_i |f(I_i)\rangle \otimes |i\rangle$$

と書けます。ここで $|f(I_i)\rangle$ は、整数画素値をビット列に変換する関数(例え

ば $f(125)=01111101$)とします。測定結果のビット列がそのまま座標と濃淡値を示すため、読出しが決定的な反面、8bit画像では $2m + 8$ 量子ビットが必要です。図5にNEQRの計測ヒストグラムを示します。八つの輝度量子ビットは2値ビット列として保持されているため、該当する画素位置が計測されれば直接画素値が復号できます。言い換えれば、位置量子ビット01が計測されるとき輝度量子ビットは必ず01111101が計測されます。そのため、FRQIに比べて確率の復元がいらず、少ない計測回数で画像復号ができます。また、輝度がデジタル表現されているため、論理ゲートで構成できる演算は容易に実装することができます。

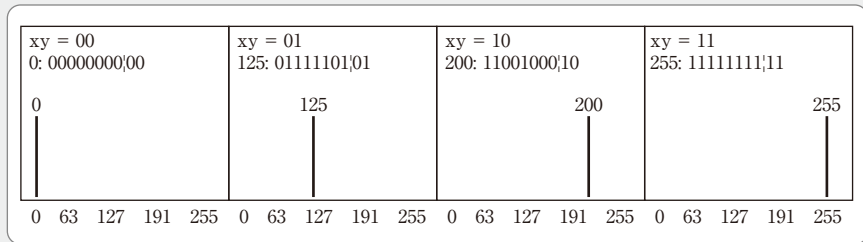


図5 NEQR

4. むすび

同じ2×2画像でも、量子画像表現には画素・振幅・角度・ビット列という4通りの見え方がわかります。量子ビット数を抑えたいならQPIE、少数ビットで画像処理向けの

構造を保ちたいならFRQI、読出しやすさや実装を重視するならNEQRが有力です。Qubit Latticeは実用的ではありませんが、古典画像から量子画像への最初の橋渡しとして有用です。また、画像復元のための計測回数⁵⁾も重要な要素です。他にも各量子画像表

現では実装できる演算に制限があったり、カラー画像用途や周波数変換用途の別表現があったりするため、用途に応じて選択することが重要です。

(2026年3月28日受付)

参考文献

- 1) S.E. Venegas-Andraca and S. Bose: "Storing, processing and retrieving an image using quantum mechanics", in Proc. SPIE, Quantum information and computation, 5105 (2003)
- 2) X.-W. Yao et al.: "Quantum Image Processing and Its Application to Edge Detection: Theory and Experiment", Physical Review X, 7, 031041 (2017)
- 3) P.Q. Le, F. Dong and K. Hirota: "A Flexible Representation of Quantum Images for Polynomial Preparation, Image Compression and Processing Operations", Quantum Information Processing, 10, 1, pp.63-84 (2011)
- 4) Y. Zhang, K. Lu, Y. Gao and M. Wang: "NEQR: A Novel Enhanced Quantum Representation of Digital Images", Quantum Information Processing, 12, 8, pp.2833-2860 (2013)
- 5) K. Okada, A. Hasegawa, Y. Maeda, D. Sugimura, M. Hasegawa and N. Fukushima: "Theoretical and Numerical Analysis of Measurement Limits in Quantum Image Representations: Qubit Lattice, FRQI and NEQR", in Proc. Visual Communications and Image Processing (VCIP) (2025)



ふくしま のりしげ
福嶋 慶繁

2009年、名古屋大学博士課程修了。2009年、同大学助教を経て、2015年、同大学准教授、2026年、同大学教授。画像信号処理、3次元画像処理、並列画像処理、量子画像処理などメディア信号処理技術の研究に従事。博士(工学)。