

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7547544号
(P7547544)

(45)発行日 令和6年9月9日(2024.9.9)

(24)登録日 令和6年8月30日(2024.8.30)

(51)国際特許分類 F I
G 0 6 N 10/60 (2022.01) G 0 6 N 10/60

請求項の数 20 外国語出願 (全21頁)

(21)出願番号	特願2023-65092(P2023-65092)	(73)特許権者	502208397
(22)出願日	令和5年4月12日(2023.4.12)		グーグル エルエルシー
(62)分割の表示	特願2021-119639(P2021-119639))の分割		Google LLC
原出願日	平成29年12月18日(2017.12.18)		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94 043 マウンテン ビュー アンフィシ アター パークウェイ 1600 1600 Amphitheatre P arkway 94043 Mounta in View, CA U.S.A.
(65)公開番号	特開2023-99003(P2023-99003A)	(74)代理人	100108453
(43)公開日	令和5年7月11日(2023.7.11)		弁理士 村山 靖彦
審査請求日	令和5年5月12日(2023.5.12)	(74)代理人	100110364
(31)優先権主張番号	62/506,319		弁理士 実広 信哉
(32)優先日	平成29年5月15日(2017.5.15)	(74)代理人	100133400
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		弁理士 阿部 達彦

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 量子コンピューティングシステム内の演算子平均化

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

量子コンピューティングデバイスによって実施される方法であって、前記方法は、
 古典プロセッサから、初期量子状態と、物理システムの量子力学的オブザーバブルを表す
 演算子の組合せとを指定するデータを受信するステップであって、前記演算子の組合せは、
 前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値の制約に基づき、前記量子力学的オブザー
 バブルと同じ期待値を有する、ステップと、
 前記初期量子状態の独立したコピーを準備するステップと、
 前記初期量子状態の前記独立したコピーに対して前記演算子の組合せの測定を実施するス
 テップと、
 前記量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための前記演算子の組合せの前記測定
 の結果を表すデータを、前記古典プロセッサに送信するステップと、を含む、
 方法。

【請求項2】

前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約は、前記物理システムに含
 まれる粒子間の相互作用を使用して決定される、請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約のうち1つまたは複数は、
 エネルギー保存定数を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項4】

前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約のうち1つまたは複数は、運動量保存定数を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項5】

前記物理システムの前記量子力学的オブザーバブルは、前記物理システムのダイナミクスを記述するハミルトニアンを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項6】

前記ハミルトニアンが、キュービット演算子の重み付き線形結合を含む、請求項5に記載の方法。

【請求項7】

前記制約の各々の期待値はゼロに等しい、請求項1に記載の方法。

10

【請求項8】

前記演算子の組合せは、前記量子力学的オブザーバブルおよび前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約の重み付き線形結合を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項9】

前記初期量子状態の前記独立したコピーに対して前記演算子の組合せの測定を実施するステップは、並行して前記演算子の組合せの対角項を測定するステップを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項10】

前記制約は、(i)等式制約または(ii)不等式制約のうち1つまたは複数を含む、請求項1に記載の方法。

20

【請求項11】

前記制約は、純粋状態制約を含み、純粋状態制約は、量子システムの測定された量子状態をデコヒーレンスされた量子状態から最も近い純粋量子状態にマッピングさせる制約を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項12】

前記演算子の組合せは、エルミートである、請求項1に記載の方法。

【請求項13】

量子コンピューティングデバイスであって、複数のキュービットを含む物理システムと、

前記物理システムを操作するように構成された1つまたは複数の制御デバイスと、を含み、前記1つまたは複数の制御デバイスは、前記物理システムの演算子の測定を実施し、それぞれの測定結果を古典プロセッサに送信するように構成された1つまたは複数の測定デバイスを含み、

30

前記量子コンピューティングデバイスは、

前記古典プロセッサから、初期量子状態と、物理システムの量子力学的オブザーバブルを表す演算子の組合せとを指定するデータを受信することであって、前記演算子の組合せは、前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値の制約に基づき、前記量子力学的オブザーバブルと同じ期待値を有する、受信することと、

前記初期量子状態の独立したコピーを準備することと、

前記初期量子状態の前記独立したコピーに対して前記演算子の組合せの測定を実施することと、

40

前記量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための前記演算子の組合せの前記測定の結果を表すデータを、前記古典プロセッサに送信することと、を含む動作を実施するように構成される、

量子コンピューティングデバイス。

【請求項14】

前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約は、前記物理システムに含まれる粒子間の相互作用を使用して決定される、請求項13に記載の量子コンピューティングデバイス。

【請求項15】

50

前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約のうち1つまたは複数は、エネルギー保存定数を含む、請求項13に記載の量子コンピューティングデバイス。

【請求項16】

前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約のうち1つまたは複数は、運動量保存定数を含む、請求項13に記載の量子コンピューティングデバイス。

【請求項17】

前記物理システムの前記量子力学的オブザーバブルは、前記物理システムのダイナミクスを記述するハミルトニアンを含む、請求項13に記載の量子コンピューティングデバイス。

【請求項18】

前記ハミルトニアンが、キュービット演算子の重み付き線形結合を含む、請求項17に記載の量子コンピューティングデバイス。

10

【請求項19】

前記制約の各々の期待値はゼロに等しい、請求項13に記載の量子コンピューティングデバイス。

【請求項20】

前記演算子の組合せは、前記量子力学的オブザーバブルおよび前記量子力学的オブザーバブルの項の期待値に対する前記制約の重み付き線形結合を含む、請求項13に記載の量子コンピューティングデバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本明細書は、量子コンピューティングに関する。

【背景技術】

【0002】

量子アルゴリズムは、量子計算の現実的なモデル、たとえば、計算の量子回路モデルに対して実行するアルゴリズムである。古典アルゴリズムは、タスクを解決するためのステップバイステップのプロシージャであり、各ステップは、古典コンピュータによって実施される。同様に、量子アルゴリズムは、タスクを解決するためのステップバイステップのプロシージャであり、各ステップは、量子コンピュータによって実施される。

【先行技術文献】

30

【非特許文献】

【0003】

【文献】「Pure-N-representability conditions of two-fermion reduced density matrices」、David A. Mazziotti、Phys. Rev. A 94、032516

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本明細書は、状態準備および測定反復の数を低減して、量子アルゴリズムまたは古典-量子アルゴリズム内の演算子平均化を実施するための技術について説明する。

【課題を解決するための手段】

40

【0005】

一般に、本明細書で説明される主題の1つの革新的な態様は、量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための、1つまたは複数の量子デバイスおよび1つまたは複数の古典プロセッサによって実施される方法であって、オブザーバブルに関連付けられた第1の演算子を識別するステップであって、第1の演算子が項の線形結合を含む、ステップと、第1の演算子に基づいて、線形結合における項のうちの1つまたは複数の期待値に対する1つまたは複数の制約を決定するステップと、第2の演算子を定義するステップであって、第2の演算子が第1の演算子と決定された制約のうちの1つまたは複数の組合せを含む、ステップと、第2の演算子を使用して量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するステップとを含む方法において実装され得る。

50

【 0 0 0 6 】

この態様の他の実装形態は、各々が方法のアクションを実施するように構成された、対応するコンピュータシステム、装置、および1つまたは複数のコンピュータ記憶デバイス上に記録されたコンピュータプログラムを含む。1つまたは複数の古典コンピュータおよび/または量子コンピュータのシステムは、動作中にシステムにアクションを実施させるソフトウェア、ファームウェア、ハードウェア、またはそれらの組合せをシステムにインストールしたことにより、特定の動作またはアクションを実施するように構成され得る。1つまたは複数のコンピュータプログラムは、データ処理装置によって実行されると装置にアクションを実施させる命令を含むことにより、特定の動作またはアクションを実施するように構成され得る。

10

【 0 0 0 7 】

上記の実装形態および他の実装形態はそれぞれ、単独でまたは組み合わせて、以下の特徴のうちの1つまたは複数を選択して含むことができる。いくつかの実装形態では、第2の演算子を使用して量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するステップは、1つまたは複数の量子デバイスに含まれる量子システムの初期状態を準備するステップと、1つまたは複数の量子デバイスによって、初期量子状態の複数の独立したコピーに対して第2の演算子の複数の測定を実施するステップと、1つまたは複数の古典プロセッサによって、量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するために複数の測定の結果を処理するステップとを含む。

20

【 0 0 0 8 】

いくつかの実装形態では、目標精度まで第2の演算子を使用してオブザーバブルの期待値を推定するために必要とされる測定の数、目標精度まで第1の演算子を使用して演算子の期待値を推定するために必要とされる測定の数よりも少ない。

【 0 0 0 9 】

いくつかの実装形態では、方法は、推定された期待値を使用して量子システムをシミュレートするステップをさらに含む。

【 0 0 1 0 】

いくつかの実装形態では、第1の演算子は、

【 0 0 1 1 】

【 数 1 】

$$H = \sum_{\gamma} w_{\gamma} H_{\gamma}$$

30

【 0 0 1 2 】

によって与えられ、 w はスカラー係数を表し、 H はキュービットに作用する1スパス自己逆元演算子を表す。

【 0 0 1 3 】

いくつかの実装形態では、キュービットに作用する1スパス自己逆元演算子は、パウリ演算子の文字列を含む。

40

【 0 0 1 4 】

いくつかの実装形態では、第1の演算子を使用してオブザーバブルの期待値を推定するステップは、 $(\langle w | \rho | w \rangle / \langle w | w \rangle)$ 測定を実施するステップを含み、 ϵ は所定の精度を表す。

【 0 0 1 5 】

いくつかの実装形態では、1つまたは複数の制約は等式制約を含む。

【 0 0 1 6 】

いくつかの実装形態では、1つまたは複数の制約の各々の期待値はゼロに等しい。

【 0 0 1 7 】

いくつかの実装形態では、第2の演算子は、

【 0 0 1 8 】

50

【数 2】

$$H' = H + \sum_k a_k C_k$$

【0019】

によって与えられ、 a_k はスカラー係数を表し、 C_k は決定された制約を表す。

【0020】

いくつかの実装形態では、第2の演算子を使用してオブザーバブルの期待値を決定するステップは、 $(|w + \sum_k a_k C_k| / \sqrt{\sum_k a_k^2})$ 測定を実施するステップを含み、 ϵ は所定の精度を表す。

10

【0021】

いくつかの実装形態では、方法は、第1の演算子をベクトルとして表すステップと、決定された制約を行列として表すステップと、ベクトルおよび行列に基づいて凸最適化タスクを定義するステップと、第2の演算子を使用してオブザーバブルの期待値を決定するために必要とされる測定の数を決定するために、凸最適化タスクを解決するステップとをさらに含む。

【0022】

いくつかの実装形態では、方法は、恒等式の項を消去する追加の制約を1つまたは複数の制約に追加するステップをさらに含む。

20

【0023】

いくつかの実装形態では、方法は、第2の演算子がエルミートではないと決定するステップと、第2の演算子にエルミート性を取り戻させるステップとをさらに含む。

【0024】

いくつかの実装形態では、第2の演算子にエルミート性を取り戻させるステップは、 n 電子マニホールドにおいて第1の演算子と等スペクトルである新しい演算子を作成するステップを含み、新しい演算子に関連付けられたオブザーバブルを信頼性高く推定するために必要とされる測定の数は、第2の演算子に関連付けられたオブザーバブルを信頼性高く推定するために必要とされる測定の数に応じてスケールする。

【0025】

いくつかの実装形態では、第1の演算子は第1のハミルトニアンを含み、第2の演算子は第2のハミルトニアンを含む。

30

【0026】

いくつかの実装形態では、制約は、(i)等式制約または(ii)不等式制約のうちの1つまたは複数を含む。

【0027】

いくつかの実装形態では、制約は純粋状態制約を含み、純粋状態制約は、量子システムの測定された量子状態をデコヒーレンスされた量子状態から最も近い純粋量子状態にマッピングさせる制約を含む。

【0028】

いくつかの実装形態では、第2の演算子は項の線形結合を含み、第2の演算子を使用してオブザーバブルの期待値を決定するステップは、並行して第2の演算子の対角項を測定するステップを含む。

40

【0029】

本明細書で説明される主題は、以下の利点のうちの1つまたは複数を実現するために特定の方法で実装され得る。

【0030】

一般に、化学的精度のために、すべてのキュービットの状態準備および測定の数千万の実験的反復が、目標精度まで演算子の期待値を推定するために必要とされる。本明細書で説明される技法を適用することによって、状態準備および測定の実験的反復の必要数が低

50

減される。したがって、量子アルゴリズムまたは古典-量子アルゴリズムの一部として本明細書で説明されるように演算子平均化を実装するシステムは、より効率的な計算時間を実現し得る。加えて、必要とされる状態準備および測定の実験的反復の数を低減することによって、量子アルゴリズムまたは古典-量子アルゴリズムの一部として本明細書で説明されるように演算子平均化を実装するシステムは、より少ない計算リソースを必要とし、量子アルゴリズムまたは古典-量子アルゴリズムを実施することに関連付けられたコストを改善し得る。

【0031】

本明細書の主題の1つまたは複数の実装形態の詳細は、添付の図面および以下の説明に記載される。主題の他の特徴、態様、および利点は、説明、図面、および特許請求の範囲から明らかとなろう。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図1】例示的な量子コンピューティングシステムを示す図である。

【図2】量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための例示的なプロセスの流れ図である。

【図3】オブザーバブルの期待値を決定するために必要とされる測定の数を最小化するための例示的なプロセスの流れ図である。

【図4】量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の値を比較する一連の例示的なプロットを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0033】

様々な図面における同様の参照番号および名称は、同様の要素を示す。

【0034】

多くのハイブリッド量子-古典アルゴリズムは、1つまたは複数の演算子平均化ステップを含み、ここで、量子力学的オブザーバブルに対応する演算子の期待値は、計算基底状態の確率をアグリゲートするために、反復された状態準備および測定によって推定される。たとえば、変分量子固有値ソルバー(VQE: variational quantum eigensolver)は、量子システムのエネルギー、たとえば、基底状態エネルギーを推定するために量子シミュレーションにおいて使用され得る量子-古典アルゴリズムである。VQEアルゴリズムは、変分パラメータのセットを使用して量子状態を準備することと、量子システムのエネルギー期待値を決定するためにハミルトニアンのパウリ演算子分解を使用して状態の測定を実施することを含む量子サブルーチンを含む。エネルギー期待値を決定すること(例示的な演算子平均化プロセス)は、量子サブルーチンのあらゆるステップにおいてハミルトニアン内のあらゆる項に対して行われるので、VQEアルゴリズムのこのステップは速度制限となり得る。サブルーチンによって必要とされる測定の数は、ハミルトニアン項を整流グループにグループ化し、小さい係数でハミルトニアン項を落とすことによって低減され得るが、そのようなプロシージャは、エネルギー期待値を推定するために測定される必要がある項の数の全体的なスケーリングを変更しない。

【0035】

演算子平均化ステップを含む他の例示的な量子-古典アルゴリズムは、組合せ最適化タスクを解決するための量子近似最適化アルゴリズム(QAOA: quantum approximate optimization algorithm)を含む。

【0036】

本明細書は、量子システムまたは量子システムの演算子に存在する構造を使用して(本明細書では演算子平均化とも呼ばれる)演算子の期待値を推定するための方法およびシステムについて説明する。構造は、期待値が取ることができる値を制約するために使用される。たとえば、フェルミオン量子システムを記述するハミルトニアン H の期待値は、2粒子縮約密度行列(2-RDM)を定義する。そのようなフェルミオン量子システムは、複数の制約を有する。たとえば、2-RDMは半正定値であり、一定のトレース、一定のランクを有しなければ

10

20

30

40

50

ばならず、エルミートでなければならない。他の制約はフェルミオンの反対称性から生じる。そのような制約は量子力学の基本原理の結果であり、期待値が取ることのできる値を制限する。制約に関する情報は、演算子の期待値を推定するために必要な測定の数をも低減するためにシステムによって活用され、システムの計算効率を改善する。

【0037】

おもちゃの例として、量子システムが式(1)において以下で与えられるハミルトニアンによって記述されると仮定する。

$$H_{\text{example}} = w H = 3.0 * X_1 X_2 + 2.0 * Y_3 Y_7 - 1.7 * X_1 Y_7 \quad (1)$$

式(1)において、パウリ演算子 X_1 、 X_2 、 Y_3 および Y_7 の期待値は、以下の式(2)において与えられる制約に従って制限され得る。

$$X_1 X_2 + Y_3 Y_7 = 1 \quad (2)$$

この制約は、エネルギー保存則または運動量保存則の結果である場合があり、量子システムを記述する対応するハミルトニアンに依存する。 H_{example} を測定するために、システムは制約(2)内の情報を利用し得る。たとえば、システムは、 $X_1 X_2 = 1 - Y_3 Y_7$ と決定し、それに応答して、エネルギー期待値 $H_{\text{example}} = 3.0 * X_1 X_2 + 2.0 * Y_3 Y_7 - 1.7 * X_1 Y_7 = 3.0 * (1 - Y_3 Y_7) + 2.0 * Y_3 Y_7 - 1.7 * X_1 Y_7$ を推定するために、量 $X_1 X_2$ または $Y_3 Y_7$ のうちの1つのみが測定される必要があると決定して、 H_{example} を決定するために必要な測定の数をも低減することができる。

【0038】

図1は、量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための例示的な量子コンピューティングシステム100を示す。例示的なシステム100は、以下で説明されるシステム、構成要素、および技法が実装され得る、1つまたは複数のロケーションにおける1つまたは複数の古典コンピュータまたは量子コンピューティングデバイス上の古典的コンピュータプログラムまたは量子コンピュータプログラムとして実装されるシステムの例である。

【0039】

システム100は、古典プロセッサ104とデータ通信している量子ハードウェア102を含む。システム100は、量子ハードウェア102および古典プロセッサ104を使用して、量子計算と組み合わせて古典計算を実施するように構成され得る。たとえば、システム100は、ハイブリッド量子-古典アルゴリズム、たとえば、量子サブルーチンが古典計算の内部で実行されるアルゴリズムを実施するように構成され得る。システム100が実施するように構成され得る例示的なハイブリッド量子-古典アルゴリズムは、変分量子固有値ソルバー(VQE)アルゴリズムまたは量子近似最適化アルゴリズム(QAOA)を含む。

【0040】

量子ハードウェア102は、量子計算を実施するための構成要素を含む。たとえば、量子ハードウェア102は、物理システム110を含んでもよい。物理システム110は、1つまたは複数のマルチレベル量子サブシステム、たとえば、キュービットまたはキューディットを含む。いくつかの実装形態では、マルチレベル量子サブシステムは、超伝導キュービット、たとえば、Gmonキュービットであり得る。システム100が利用するマルチレベル量子サブシステムのタイプは、対象となる物理システムに依存する。たとえば、いくつかの場合では、1つまたは複数の超伝導キュービット、たとえば、GmonキュービットまたはXmonキュービットに接続された1つまたは複数の共振器を含むことが便利であり得る。他の場合では、イオントラップ、光子デバイスまたは超伝導キャビティ(キュービットを必要とすることなしに状態が準備され得る)が使用され得る。マルチレベル量子サブシステムの実現のさらなる例は、fluxmonキュービット、シリコン量子ドットまたはリン不純物キュービットを含む。いくつかの場合では、マルチレベル量子サブシステムは、量子回路の一部であり得る。

【0041】

量子ハードウェア102は、1つまたは複数の制御デバイス112、たとえば、物理システム110上で動作する1つまたは複数の量子論理ゲートを含んでもよい。1つまたは複数の制御デバイス112は、測定デバイス、たとえば、読み出し共振器をさらに含んでもよく、読

10

20

30

40

50

み出し共振器は、物理システム110に関連付けられた演算子、たとえば、ハミルトニアンを測定し、測定結果を古典プロセッサ104に送るように構成される。

【0042】

古典プロセッサ104は、古典計算を実施するための構成要素を含む。古典プロセッサ104は、物理システム110の初期状態および対応する対象となる量子力学的オブザーバブルを指定するデータを生成し、生成されたデータを量子ハードウェア102に送信するように構成され得る。たとえば、量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための改善されたプロセスの一部として、図2および図3に関して以下で説明されるように、古典プロセッサ104は、量子力学的オブザーバブルに関連付けられた第1の演算子、たとえば、ハミルトニアンを識別するように構成され得る。古典プロセッサ104は、定義された第1の演算子に基づいて、制約生成モジュール114を使用して、線形結合における項のうちの1つまたは複数の期待値に対する1つまたは複数の制約を決定するようにさらに構成され得る。たとえば、物理システム110が複数の相互作用粒子を含む場合、古典プロセッサ104は、粒子のいくつかまたはすべての間の相互作用または関係を決定するために、相互作用粒子のシステムを記述するハミルトニアンを解析し得る。そのような相互作用または関係は、ハミルトニアンの項の期待値に対する物理的制約を識別するために使用され得る。他の制約は、図2に関して以下でより詳細に説明されるように、他のエネルギー保存則または運動量保存則に基づき得る。

10

【0043】

古典プロセッサは、第1の演算子と決定された制約のうちの1つまたは複数の組合せである第2の演算子を定義し、第2の演算子を指定するデータを量子ハードウェア102に提供するように構成され得る。第2の演算子に基づいたオブザーバブルの測定値のセットを受信したことに応答して、古典プロセッサ104は、オブザーバブルの期待値を推定し得る。例示的な量子コンピューティングシステム100などの量子コンピューティングシステムを使用して量子システムの量子状態における量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための例示的なプロセスは、図2に関して以下で詳細に説明される。

20

【0044】

いくつかの実装形態では、古典プロセッサ104は、シンプレックス法を使用して凸最適化タスクを解決するなど、他の古典的計算タスクを実施するようにさらに構成され得る。

【0045】

システム100は、対象となる物理システム、たとえば、ポリマーなどの材料、太陽電池、バッテリー、触媒コンバータまたは薄膜電子部品などのデバイス、または高温超伝導を示すシステムをモデル化またはシミュレートするために使用され得る。これらの実装形態では、システム100は、量子力学的オブザーバブルの期待値、たとえば、対象となる物理システムのエネルギー期待値を推定するように構成され得る。たとえば、シミュレーション中に、量子ハードウェア102は、対象となる物理システムの初期状態および対象となるオブザーバブルを指定する入力データ、たとえば、入力データ106を受信し得る。量子ハードウェア102は、指定された初期状態を繰り返し準備し、オブザーバブルを測定して、オブザーバブルの測定された値のセットを表す出力データ、たとえば、出力データ108を生成し得る。生成された出力データは、処理のために古典プロセッサ104に提供され得る。たとえば、古典プロセッサ104は、測定された値のセットを使用して、オブザーバブルの推定された期待される値を表すデータ、たとえば、出力データ116を生成し得る。

30

40

【0046】

いくつかの実装形態では、オブザーバブルの推定された期待される値は、システム100によって実施される計算の一部として、さらに処理または解析され得る。たとえば、物理システムが材料、たとえば、金属またはポリマーである場合、生成された出力データは、材料の特性、たとえば、その伝導性を決定するために古典プロセッサ104によって使用され得る。

【0047】

図2は、量子力学的オブザーバブルの期待値を推定するための例示的なプロセス200の

50

流れ図である。便宜上、プロセス200は、1つまたは複数のロケーションに配置された1つまたは複数の古典または量子コンピューティングデバイスのシステムによって実施されるものとして説明される。たとえば、量子計算システム、たとえば、本明細書に従って適切にプログラムされた図1のシステム100は、プロセス200を実施することができる。

【0048】

システムは、量子力学的オブザーバブルに関連付けられた第1の演算子を識別する(ステップ202)。第1の演算子は、以下の式(3)によって与えられるヒルベルト空間上の任意のLスパスエルミート演算子であり得る。

【0049】

【数3】

$$H = \sum_{l=1}^{L-1} w_l H_l \quad (3)$$

10

【0050】

式(3)において、 w_l は実スカラー係数を表すことができ、 H_l はキュービットに作用する1スパス自己逆元演算子、たとえば、パウリ演算子 X_i 、 Y_i 、 Z_i の文字列を表すことができ、 i は、演算子が演算対象とするキュービットを示し、ただし、

【0051】

【数4】

$$H_l^2 = \mathbb{I}$$

20

【0052】

である。たとえば、プロセス200は、量子システムのエネルギー期待値を推定するために使用され得る。この例では、システムは、量子システムを記述する第1のハミルトニアンを識別し得る(ステップ202)。

【0053】

識別された第1の演算子の期待値は、初期量子状態 $|\psi\rangle$ のM個の独立したコピーに対してM回の測定を実施することによって推定されてもよく、実施される測定のタイプは、量子力学的オブザーバブルに依存する。たとえば、量子システムのエネルギー期待値は、量子システムを記述するハミルトニアンのM回の測定を実施することによって推定されてもよい。典型的には、演算子の期待値を取得するために必要とされる測定の総数Mは、

30

【0054】

【数5】

$$M = \sum_{l=0}^L M_l \leq \left(\frac{1}{\epsilon} \sum_{l=1}^L |w_l| \right)^2 = \frac{\Lambda^2}{\epsilon^2} \quad (4)$$

40

【0055】

に応じてスケールし、 ϵ は目標精度を表し、 w_l は式(3)に関して上記で定義されている。

【0056】

システムは、第1の演算子の期待値に対する1つまたは複数の制約を決定する(ステップ204)。たとえば、システムは、上記の式(3)によって与えられる演算子の線形結合における項のうちの1つまたは複数の期待値に対する1つまたは複数の制約を決定し得る。第1の演算子の期待値に対する1つまたは複数の制約を決定することは、第1の演算子の特性を決定するために、第1の演算子、たとえば、第1の演算子の構造を解析することを含み得る。決定された特性は、演算子の項の期待値に対する物理的制約を識別するために使用され得る。

50

【 0 0 5 7 】

たとえば、プロセス200が相互作用粒子のシステムのエネルギー期待値を推定するために使用される場合、システムは、粒子のいくつかまたはすべての間の相互作用または関係を決定するために、相互作用粒子のシステムを記述するハミルトニアンを解析し得る。そのような相互作用または関係は、ハミルトニアンの中の期待値に対する物理的制約を識別するために使用され得る。たとえば、第1の粒子が第1のスピンを有すると決定される場合、対応する第2の粒子は、第1のスピンとは反対の第2のスピンを有し得る。スピンのこの特性は、第1の粒子および第2の粒子の対応する制約、たとえば、第1の粒子および第2の粒子を含むサブシステムのエネルギー期待値が保存定数に等しいことを示す制約を決定するために使用され得る。他の制約は、他のエネルギー保存則または運動量保存則に基づき得る。

10

【 0 0 5 8 】

いくつかの実装形態では、制約は等式制約を含み得る。他の実装形態では、制約は不等式制約、または等式制約と不等式制約の両方の組合せを含み得る。制約が等式制約を含む実装形態では、制約はゼロに等しい期待値の合計として書かれてもよく、たとえば、各制約の期待値はゼロに等しくてもよい。たとえば、K個の等式制約のリストを仮定すると、k番目の制約 C_k は以下の式(5)によって与えられ得る。

【 0 0 5 9 】

【数6】

$$C_k = \sum_{l=0}^{L-1} c_{k,l} \langle H_l \rangle = 0 \quad (5)$$

20

【 0 0 6 0 】

式(5)において、 $c_{k,l}$ は実スカラー係数を表す。いくつかの実装形態では、式(5)によって与えられる等式制約は、1つまたは複数の定数項、たとえば、等式の合計がゼロになることを保証する

【 0 0 6 1 】

【数7】

$$H_0 = \mathbb{I}$$

30

【 0 0 6 2 】

を含み得る。

【 0 0 6 3 】

そのような制約は、たとえば、期待値の間の関係についての追加情報をシステムに提供し、この情報は、対応するオブザーパブルの推定を取得するために必要とされる測定の数Mを低減するために使用され得る。たとえば、システムは、測定の数Mを最小化するために、ステップ202において識別された演算子に制約 C_k を追加してもよい。

40

【 0 0 6 4 】

より具体的には、システムは、第2の演算子を定義する(ステップ206)。第2の演算子は第1の演算子と決定された制約 C_k のうちの1つまたは複数の組合せを含む。式(3)に関して上記の例を続けると、第2の演算子は以下の式(6)によって与えられ得る。

【 0 0 6 5 】

【数8】

$$H' = H + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k C_k = \sum_{l=0}^{L-1} \left(w_l + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k c_{k,l} \right) H_l, \quad (6)$$

50

【 0 0 6 6 】

式(6)において、すべての k について $H = H'$ であり、 c_k は実スカラー係数を表す。この関係は、式(6)において上記で与えられた定義に起因して N 個の表現可能状態について $C_k=0$ であるという観測から得られる。

【 0 0 6 7 】

いくつかの実装形態では、第2の演算子はエルミートではないことがある。たとえば、制約 C_k はエルミート演算子または反エルミート演算子のいずれかであり得る。特に、制約は、量子システムを記述する密度行列の反エルミート成分をゼロになるように制約する形態を取り得る(したがって、それらの制約 C_k はそれら自体が反エルミート演算子である)。したがって、第2の演算子はエルミートではないことがある。これらの実装形態では、システムは、新しい演算子 $H^*=(H'+(H')^\dagger)/2$ を作成することによって、第2の演算子に関連付けられたオブザーバブルを信頼性高く推定するために必要とされる測定の数のスケールを変更することなしに、第2の演算子にエルミート性を取り戻させることができる。新しい演算子は n 電子マニホールドにおいて第1の演算子と等スペクトルであり、新しい演算子に関連付けられたオブザーバブルを信頼性高く推定するために必要とされる測定の数は、第2の演算子に関連付けられたオブザーバブルを信頼性高く推定するために必要とされる測定の数に応じてスケールする。

10

【 0 0 6 8 】

システムは、第2の演算子に関連付けられたオブザーバブルを推定する(ステップ208)。いくつかの実装形態では、第2の演算子に関連付けられたオブザーバブルを推定するために必要とされる測定の数は、第1の演算子に関連付けられたオブザーバブルを推定するために必要とされる測定の数よりも少ない。たとえば、上記で説明されたように、いくつかの場合では、制約は以下の式(7)を満たし得る。

20

【 0 0 6 9 】

【数9】

$$\langle C_k \rangle = \sum_{l=0}^{L-1} c_{\{k,l\}} \langle H_l \rangle = 0 \tag{7}$$

30

【 0 0 7 0 】

式(7)において、 $c_{\{k,l\}}$ は制約 C_k における H の期待値の係数である。 $C_k = 0$ であるので、第2の演算子 H' の期待される値は、期待値の線形性に起因して、以下の式(8)によって与えられ得る。

【 0 0 7 1 】

【数10】

$$\langle H' \rangle = \langle H \rangle + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k \langle C_k \rangle = \langle H \rangle \tag{8}$$

40

【 0 0 7 2 】

したがって、第1の演算子に関連付けられたオブザーバブルを測定するために、システムは代わりに、第2の演算子に関連付けられたオブザーバブルを測定し得る。たとえば、上記の式(3)によって定義される第1のハミルトニアンを使用して量子システムのエネルギー期待値を決定することは、 $(\sum |w| / \sqrt{M})$ に応じてスケールする M 回の測定を実施することを含んでもよく、 ϵ は所定の精度を表す。しかしながら、上記の式(6)によって定義される第2のハミルトニアンを使用して量子システムのエネルギー期待値を決定することは、 M よりも少なく、

【 0 0 7 3 】

50

【数 1 1】

$$M' = \left(\frac{1}{\epsilon} \sum_{l=1}^L \left(w_l + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k c_{k,l} \right) \right)^2 \leq \frac{\Lambda'^2}{\epsilon^2} = \frac{(\sum_{l=1}^L |w_l + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k c_{k,l}|)^2}{\epsilon^2} \quad (9)$$

【0074】

に応じてスケールするM'回の測定を実施することを含み、は所定の精度を表す。測定の数M'は、

【0075】

【数 1 2】

$$\sum_l |w_l + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k c_{k,l}|$$

【0076】

のに対する最小値を計算することによって最小化され得る。すなわち、システムは、式(10)において以下に与えられる量を計算し得る。

【0077】

【数 1 3】

$$\beta^* = \operatorname{argmin}_{\beta} \left(\sum_{l=0}^{L-1} \left| w_l + \sum_{k=0}^{K-1} \beta_k c_{k,l} \right| \right) \quad (10)$$

【0078】

測定の最小数M'を計算することは、図3に関して以下でより詳細に説明される。

【0079】

いくつかの実装形態では、ステップ204に関して上記で説明された制約は純粋状態制約を含み得る。純粋状態制約は、量子システムの測定された量子状態をデコヒーレンスされた量子状態から最も近い純粋量子状態にマッピングさせることができる制約として定義され、たとえば、近い(near)はヒルベルトシュミットノルムまたは他のノルムを介して定義される。純粋状態制約は、様々な技法を使用して導出または識別され得る。純粋状態制約を導出するための例示的な技法は、「Pure-N-representability conditions of two-fermion reduced density matrices」、David A. Mazziotti, Phys. Rev. A 94, 032516において与えられている。

【0080】

1つまたは複数の純粋状態制約を考慮すると、制約は様々な方法で適用され得る。たとえば、システムは、純粋状態制約を満たす測定された2次縮約密度行列(2-RDM)に最も近い2-RDMを見つけるための最適化を実施してもよい。すなわち、システムは、量子状態を記述する密度演算子'を測定してもよく、あらゆる違反された制約に対して目的関数のエネルギーがより高くなるように、すべての純粋状態制約が満たされるときに値0を有する目的関数としてf(')を定義することができる。次いで、システムは、純粋状態制約のすべてを満たすか、またはほぼ満たす'を見つけるために、f(')を最小化してもよい。この解は状態'の純粋化を表し得る。

【0081】

いくつかの場合では、このプロセスは、正しいエネルギーからさらに離れたエネルギー推定値を取り得る。しかしながら、システムがこのプロセスを量子変分アルゴリズムの内側ループとして実施する場合、量子変分アルゴリズムの外側ループは、正確なエネルギーによって、純粋状態に投影する状態'にシステムを追いやることのできる。

【0082】

推定されたオブザーバブルは、量子システムをシミュレートするために使用され得る。

たとえば、図1に関して上記で説明されたように、推定されたオブザーバブルは、量子システムの特性を決定するために使用され得る。たとえば、推定されたエネルギー期待値は、金属の伝導性を決定するために使用され得る。

【0083】

いくつかの実装形態では、プロセス200は、量子システムの他の特性またはシミュレーションメトリックを推定するために使用され得る。たとえば、プロセスは、(ハミルトニアンとのノルムに関する) Trotter エラーを低減するために使用され得る。

【0084】

図3は、オブザーバブルの期待値を決定するために必要とされる測定の数をも最小化するための例示的なプロセスの流れ図である。便宜上、プロセス300は、1つまたは複数のロケーションに配置された1つまたは複数の古典または量子コンピューティングデバイスのシステムによって実施されるものとして説明される。たとえば、量子計算システム、たとえば、本明細書に従って適切にプログラムされた図1のシステム100は、プロセス300を実施することができる。

10

【0085】

システムは、図2のステップ202に関して上記で説明された第1の演算子をベクトル v_H として表す(ステップ302)。ベクトル v_H の各要素は、異なるフェルミオン演算子、すなわち、フェルミオンの消滅演算子または生成演算子

【0086】

【数14】

$$a_p^\dagger$$

20

【0087】

と a_q の組合せに対応し得る。たとえば、システムは、フェルミオン演算子

【0088】

【数15】

$$a_p^\dagger a_q$$

30

【0089】

をベクトル要素 $1+N+p+qN$ にマッピングし、フェルミオン演算子

【0090】

【数16】

$$a_p^\dagger a_q^\dagger a_r a_s$$

【0091】

をベクトル要素 $1+N+N^2+p+qN+rN^2+sN^3$ にマッピングしてもよく、ベクトルのエントリは項の係数に対応する。言い換えれば、ハミルトニアン項の係数はベクトル形式で表され得る。フェルミオン演算子

40

【0092】

【数17】

$$a_p^\dagger a_q$$

【0093】

に対応する N^2 個の項があるので、ベクトルの最初の N^2 個のエントリは、

【0094】

【数18】

50

$$a_p^\dagger a_q$$

【 0 0 9 5 】

項の係数を含む。次いで、ベクトルの残りの N^4 個のエントリは、

【 0 0 9 6 】

【 数 1 9 】

$$a_p^\dagger a_q^\dagger a_r a_s$$

10

【 0 0 9 7 】

項の係数を含むことになる。

【 0 0 9 8 】

システムは、図2のステップ204に関して上記で決定された制約を次元 $K \times L$ の行列 C として表す(ステップ304)。各制約 C_k は行列 C の行を表し、各行はステップ302に関して説明された同じ技法を使用してベクトルとして表される。いくつかの実装形態では、システムは、恒等式項を相殺するための機構を提供するために、

【 0 0 9 9 】

【 数 2 0 】

$$I = 0$$

20

【 0 1 0 0 】

に対応する制約を追加してもよい。

【 0 1 0 1 】

システムは、ベクトル v_H および行列 C を使用して凸最適化タスクを定義する(ステップ306)。たとえば、システムは、式(10)において上記で与えられた量を計算するタスクを、以下の式(11)によって与えられる凸 L_1 最小化タスクとして表してもよい。

【 0 1 0 2 】

【 数 2 1 】

$$\beta^* = \operatorname{argmin}_{\beta} (\|v_H - C^T \beta\|_1) \quad (11)$$

30

【 0 1 0 3 】

式(11)において、 v_H は次元 K のベクトルを表す。

【 0 1 0 4 】

第1のオブザーバブルに関連付けられたオブザーバブルの期待値を推定するために必要とされる測定の最適または準最適な数 M を決定するために使用され得る、最適または準最適なベクトル v_H を決定するために、システムはシンプレックス法を適用し得る。たとえば、システムは、 L_1 最小化タスクを線形計画問題、最小化

40

【 0 1 0 5 】

【 数 2 2 】

$$I^\dagger q$$

【 0 1 0 6 】

条件 $-q \leq v_H - C^T q$ として表してもよく、 q は補助変数を表す。図2および図3で説明されたプロセスの適用は、図4に関して以下で例示される。

【 0 1 0 7 】

図4は、本明細書で説明される技法、たとえば、図2および図3のプロセス200およびプ

50

ロセス300を使用して、また本明細書で説明される技法を使用することなしに、(たとえば、式(3)において上記で定義されたような)量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の上限の値を比較する一連の例示的なプロット402、404、406および408を示す。より具体的には、例示的なプロットは、上記の式(4)および式(9)において定義された σ および σ' の値を示す。プロット402~408の各々において、 σ は本明細書で説明される技法を適用する前の σ^2 の値を表す。 σ' は本明細書で説明される技法を適用した後の σ'^2 の値を表す。

【0108】

プロット402は、本明細書で説明される技法を使用して、また本明細書で説明される技法を使用することなしに、異なる化学的要素についての量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の値を比較する。プロット402のx軸は原子番号を表す。プロット402のy軸は σ^2 を表す。プロット402は、本明細書で説明される技法を適用することが周期表の第2の行と第3の行との間の値の急増に約1桁違いの改善をもたらすことを示す。

10

【0109】

プロット404は、隣接する水素の間の距離が0.7414 Å のH₂結合長で固定された、増大したサイズの最小基底における水素環の進行についての量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の値を比較する。プロット404のx軸は水素環における原子の数を表す。プロット404のy軸は σ^2 を表す。プロット404は、本明細書で説明される技法を適用することが量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の改善をもたらすことを示す。

20

【0110】

プロット406は、幾何学が本明細書で説明される技法にどのように影響するかを示し、四角形における水素間の間隔が0.1 Å から1.8 Å に変化するときの最小基底における四角形H₄環をプロットする。プロット406のx軸はH₄環におけるH-H間隔(A)を表す。プロット406のy軸は σ^2 を表す。プロット406は、本明細書で説明される技法を適用することが量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の改善をもたらすことを示す。

【0111】

プロット408は、0.7414 Å の原子間隔を有するH₄環の活性空間がダブルゼータ(cc-pVDZ)基底において実施される計算で4スピン軌道から20スピン軌道に増加したときに、本明細書で説明される技法がどのように影響されるかを示す。プロット408のx軸はH₄環の基底におけるスピン軌道の数を表す。プロット408のy軸は σ^2 を表す。プロット408は、本明細書で説明される技法を適用することが量子力学的オブザーバブルの期待される値を推定するために必要とされる測定の数の改善をもたらすことを示す。

30

【0112】

本明細書で説明されるデジタルおよび/または量子の主題ならびにデジタル機能動作および量子動作の実装形態は、デジタル電子回路、適切な量子回路またはより一般的には量子計算システムにおいて、有形に具現化されるデジタルおよび/または量子コンピュータソフトウェアもしくはファームウェアにおいて、本明細書で開示される構造およびそれらの構造的等価物を含むデジタルおよび/または量子コンピュータハードウェアにおいて、あるいはそれらのうちの1つまたは複数の組合せにおいて実装され得る。「量子計算システム」という用語は、限定はしないが、量子コンピュータ、量子情報処理システム、量子暗号システム、または量子シミュレータを含んでもよい。

40

【0113】

本明細書で説明されるデジタルおよび/または量子の主題の実装形態は、1つまたは複数のデジタルおよび/または量子コンピュータプログラム、すなわち、データ処理装置による実行のために、またはデータ処理装置の動作を制御するために有形の非一時的記憶媒体上に符号化されたデジタルおよび/または量子コンピュータプログラム命令の1つまたは複数のモジュールとして実装され得る。デジタルおよび/または量子コンピュータ記憶媒体は、

50

機械可読記憶デバイス、機械可読記憶基板、ランダムもしくはシリアルアクセスメモリデバイス、1つもしくは複数のキュービット、またはそれらのうちの1つまたは複数の組合せであり得る。代替または追加として、プログラム命令は、デジタルおよび/または量子情報を符号化することが可能な人工的に生成された伝播信号、たとえば、データ処理装置による実行のために適切な受信機装置に送信するためのデジタルおよび/または量子情報を符号化するために生成される、機械で生成された電気信号、光信号、または電磁信号上に符号化され得る。

【0114】

量子情報および量子データという用語は、量子システムによって搬送され、量子システムにおいて保持または記憶される情報またはデータを指し、最も小さい非自明なシステムは、キュービット、すなわち、量子情報の単位を定義するシステムである。「キュービット」という用語は、対応する文脈において2レベルシステムとして適切に近似され得るすべての量子システムを包含することが理解される。そのような量子システムは、たとえば、2つ以上のレベルを有するマルチレベルシステムを含み得る。例として、そのようなシステムは、原子、電子、光子、イオンまたは超伝導キュービットを含むことができる。多くの実装形態では、計算基底状態は基底状態および第1の励起状態で識別されるが、計算状態がより高いレベルの励起状態で識別される他のセットアップが可能であることが理解される。

10

【0115】

「データ処理装置」という用語は、デジタルおよび/または量子データ処理ハードウェアを指し、例として、プログラマブルデジタルプロセッサ、プログラマブル量子プロセッサ、デジタルコンピュータ、量子コンピュータ、複数のデジタルおよび量子プロセッサまたはコンピュータ、ならびにそれらの組合せを含む、デジタルおよび/または量子データを処理するためのすべての種類の装置、デバイス、および機械を包含する。装置はまた、専用論理回路、たとえば、FPGA(フィールドプログラマブルゲートアレイ)、ASIC(特定用途向け集積回路)、または量子シミュレータ、すなわち、特定の量子システムについての情報をシミュレートするかまたは生み出すように設計された量子データ処理装置であり得るか、またはそれらをさらに含むことができる。特に、量子シミュレータは、万能量子計算を実施する能力を有していない専用量子コンピュータである。装置は、ハードウェアに加えて、デジタルコンピュータプログラムおよび/または量子コンピュータプログラム用の実行環境を作成するコード、たとえば、プロセッサファームウェア、プロトコルスタック、データベース管理システム、オペレーティングシステム、またはそれらのうちの1つまたは複数の組合せを構成するコードを任意選択で含むことができる。

20

30

【0116】

プログラム、ソフトウェア、ソフトウェアアプリケーション、モジュール、ソフトウェアモジュール、スクリプト、またはコードと呼ばれるかまたはそれらとして説明されることもあるデジタルコンピュータプログラムは、コンパイラ型言語もしくはインタープリタ型言語、または宣言型言語もしくは手続き型言語を含む任意の形態のプログラミング言語で書かれ得、スタンドアロンプログラムとして、またはモジュール、構成要素、サブルーチン、もしくはデジタルコンピューティング環境において使用するのに適した他のユニットとしてを含む任意の形態で展開され得る。プログラム、ソフトウェア、ソフトウェアアプリケーション、モジュール、ソフトウェアモジュール、スクリプト、またはコードと呼ばれるかまたはそれらとして説明されることもある量子コンピュータプログラムは、コンパイラ型言語もしくはインタープリタ型言語、または宣言型言語もしくは手続き型言語を含む任意の形態のプログラミング言語で書かれ、適切な量子プログラミング言語に変換され得るか、あるいは量子プログラミング言語、たとえば、QCLまたはQuipperで書かれ得る。

40

【0117】

デジタルおよび/または量子コンピュータプログラムは、ファイルシステム内のファイルに対応し得るが、そうである必要はない。プログラムは、他のプログラムまたはデータ、

50

たとえば、マークアップ言語文書に記憶された1つまたは複数のスクリプトを保持するファイルの一部に、当該のプログラムに専用の単一のファイルに、あるいは複数の協調ファイル、たとえば、1つまたは複数のモジュール、サブプログラム、またはコードの部分を記憶するファイルに記憶され得る。デジタルおよび/または量子コンピュータプログラムは、1つのデジタルコンピュータまたは1つの量子コンピュータ上で、あるいは1つの場所に配置されるか、または複数の場所にわたって分散され、デジタルおよび/または量子データ通信ネットワークによって相互接続される複数のデジタルおよび/または量子コンピュータ上で実行されるように展開され得る。量子データ通信ネットワークは、量子システム、たとえば、キュービットを使用して量子データを送信し得るネットワークであると理解される。一般に、デジタルデータ通信ネットワークは量子データを送信することができないが、量子データ通信ネットワークは量子データとデジタルデータの両方を送信し得る。

10

【0118】

本明細書で説明されるプロセスおよび論理フローは、1つまたは複数のデジタルおよび/または量子プロセッサとともに動作し、必要に応じて、入力デジタルおよび量子データに対して動作し、出力を生成することによって機能を実施するために1つまたは複数のデジタルおよび/または量子コンピュータプログラムを実行する、1つまたは複数のプログラマブルデジタルおよび/または量子コンピュータによって実施され得る。プロセスおよび論理フローはまた、専用論理回路、たとえば、FPGAもしくはASIC、または量子シミュレータ、あるいは専用論理回路または量子シミュレータと1つまたは複数のプログラムされたデジタルおよび/または量子コンピュータの組合せによって実施され得、装置はまた、それらとして実装され得る。

20

【0119】

1つまたは複数のデジタルおよび/または量子コンピュータのシステムが特定の動作またはアクションを実施する「ように構成される」とは、システムが、動作中にシステムに動作またはアクションを実施させるソフトウェア、ファームウェア、ハードウェア、またはそれらの組合せをシステムにインストールしたことを意味する。1つまたは複数のデジタルおよび/または量子コンピュータプログラムが特定の動作またはアクションを実施するように構成されるとは、1つまたは複数のプログラムが、デジタルおよび/または量子データ処理装置によって実行されると、装置に動作またはアクションを実施させる命令を含むことを意味する。量子コンピュータは、量子コンピューティング装置によって実行されると、装置に動作またはアクションを実施させる命令をデジタルコンピュータから受信し得る。

30

【0120】

デジタルおよび/または量子コンピュータプログラムの実行に適したデジタルおよび/または量子コンピュータは、汎用もしくは専用デジタルおよび/または量子プロセッサまたは両方、あるいは任意の他の種類のデジタルおよび/または量子中央処理装置に基づき得る。一般に、デジタルおよび/または量子中央処理装置は、読取り専用メモリ、ランダムアクセスメモリ、もしくは量子データ、たとえば、光子を送信するのに適した量子システム、またはそれらの組合せから命令ならびにデジタルおよび/または量子データを受信する。

【0121】

デジタルおよび/または量子コンピュータの必須要素は、命令を実施または実行するための中央処理装置と、命令ならびにデジタルおよび/または量子データを記憶するための1つまたは複数のメモリデバイスとである。中央処理装置およびメモリは、専用論理回路または量子シミュレータによって補完されるか、またはその中に組み込まれ得る。一般に、デジタルおよび/または量子コンピュータはまた、デジタルおよび/または量子データを記憶するための1つまたは複数の大容量記憶デバイス、たとえば、磁気ディスク、光磁気ディスク、光ディスク、または量子情報を記憶するのに適した量子システムを含むか、あるいは、それらからデジタルおよび/または量子データを受信するかもしくはそれらにデジタルおよび/または量子データを転送するかまたはその両方を行うように動作可能に結合される。しかしながら、デジタルおよび/または量子コンピュータはそのようなデバイスを有する必要はない。

40

50

【0122】

デジタルおよび/または量子コンピュータプログラム命令ならびにデジタルおよび/または量子データを記憶するのに適したデジタルおよび/または量子コンピュータ可読媒体は、例として、半導体メモリデバイス、たとえば、EPROM、EEPROM、およびフラッシュメモリデバイスと、磁気ディスク、たとえば、内部ハードディスクまたはリムーバブルディスクと、光磁気ディスクと、CD-ROMおよびDVD-ROMディスクと、量子システム、たとえば、捕捉原子または捕捉電子とを含む、すべての形態の不揮発性デジタルおよび/または量子メモリ、媒体およびメモリデバイスを含む。量子メモリは、高い忠実度および効率で量子データを長期間にわたって記憶することができるデバイス、たとえば、光が送信のために使用され、重ね合わせまたは量子コヒーレンスなどの量子データの量子特徴を記憶および保存するための物質である、光-物質インターフェースであることが理解される。

10

【0123】

本明細書で説明される様々なシステムまたはそれらの一部の制御は、1つまたは複数の非一時的機械可読記憶媒体上に記憶され、1つまたは複数のデジタルおよび/または量子処理デバイス上で実行可能である命令を含む、デジタルおよび/または量子コンピュータプログラム製品において実装され得る。本明細書で説明されるシステムまたはそれらの一部はそれぞれ、1つまたは複数のデジタルおよび/または量子処理デバイスと、本明細書で説明される動作を実施するための実行可能命令を記憶するためのメモリとを含み得る装置、方法、またはシステムとして実装され得る。

【0124】

本明細書は多くの特定の实装形態の詳細を含むが、これらは、特許請求され得るものの範囲に対する制限として解釈されるべきではなく、むしろ特定の实装形態に固有であり得る特徴の説明として解釈されるべきである。別個の实装形態の文脈において本明細書で説明される一定の特徴はまた、単一の实装形態において組み合わせられて実装され得る。逆に、単一の实装形態の文脈において説明される様々な特徴はまた、複数の实装形態において別々にまたは任意の適切な副組合せで実装され得る。さらに、特徴は一定の組合せで機能するものとして上記で説明され、最初はそのように特許請求されることさえあるが、特許請求される組合せからの1つまたは複数の特徴は、いくつかの場合では、その組合せから削除されることがあり、特許請求される組合せは、副組合せまたは副組合せの変形形態を対象としてもよい。

20

30

【0125】

同様に、動作は特定の順序で図面に示されているが、これは、そのような動作が示された特定の順序でまたは逐次的な順序で実施されること、または望ましい結果を達成するためにすべての例示された動作が実施されることを必要とするものとして理解されるべきではない。一定の状況では、マルチタスクおよび並列処理が有利であり得る。さらに、上記で説明された実装形態における様々なシステムモジュールおよび構成要素の分離は、すべての実装形態においてそのような分離を必要とするものとして理解されるべきではなく、説明されたプログラム構成要素およびシステムは、一般に、単一のソフトウェア製品と一緒に統合されるか、または複数のソフトウェア製品にパッケージされることが理解されるべきである。

40

【0126】

主題の特定の实装形態について説明した。他の实装形態は、以下の特許請求の範囲の範囲内にある。たとえば、特許請求の範囲において列挙されるアクションは、異なる順序で実施され、依然として望ましい結果を達成することができる。一例として、添付の図に示されるプロセスは、望ましい結果を達成するために、示された特定の順序または逐次的な順序を必ずしも必要としない。いくつかの場合では、マルチタスクおよび並列処理が有利であり得る。

【符号の説明】

【0127】

100 量子コンピューティングシステム、システム

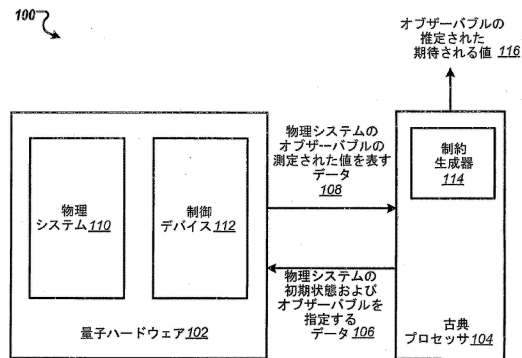
50

- 102 量子ハードウェア
- 104 古典プロセッサ
- 106 入力データ
- 108 出力データ
- 110 物理システム
- 112 制御デバイス
- 114 制約生成モジュール
- 116 出力データ
- 200、300 プロセス
- 402、404、406、408 プロット

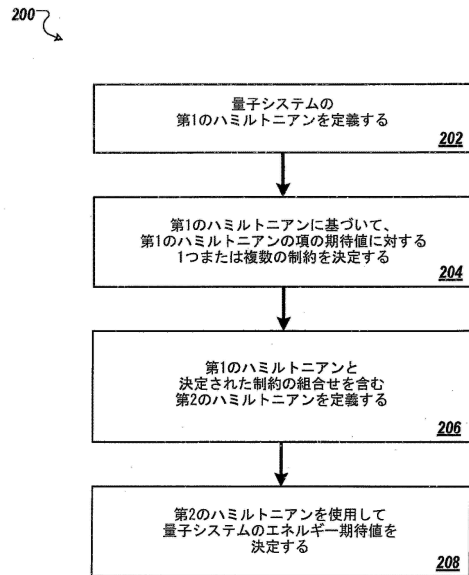
10

【図面】

【図1】



【図2】



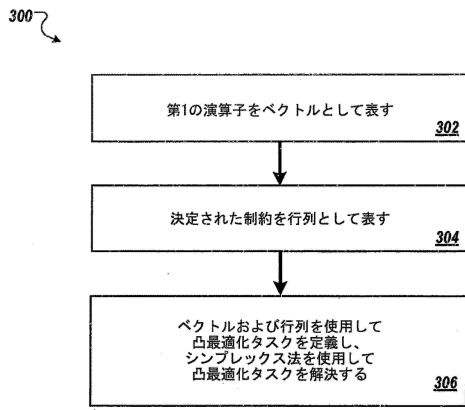
20

30

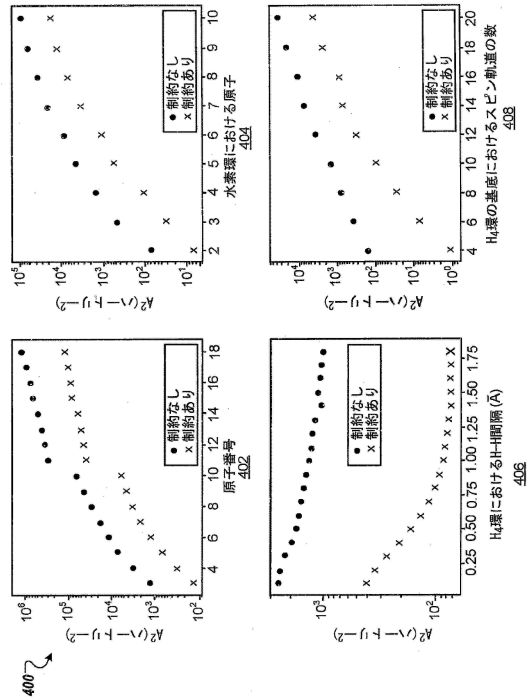
40

50

【 図 3 】



【 図 4 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 ライアン・バブシュ

アメリカ合衆国・カリフォルニア・94043・マウンテン・ビュー・アンフィシアター・パーク
ウェイ・1600

審査官 真木 健彦

(56)参考文献 米国特許出願公開第2018/0053112(US, A1)

特開2017-073106(JP, A)

国際公開第2016/044917(WO, A1)

特開2013-114366(JP, A)

特表2008-539480(JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G06N 10/00 - 10/80