

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7614424号  
(P7614424)

(45)発行日 令和7年1月15日(2025.1.15)

(24)登録日 令和7年1月6日(2025.1.6)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 6 N 10/40 (2022.01) G 0 6 N 10/40

請求項の数 20 外国語出願 (全25頁)

|           |                                     |          |  |
|-----------|-------------------------------------|----------|--|
| (21)出願番号  | 特願2024-43762(P2024-43762)           | (73)特許権者 | 502208397  |
| (22)出願日   | 令和6年3月19日(2024.3.19)                |          | グーグル エルエルシー  |
| (62)分割の表示 | 特願2022-119663(P2022-119663)<br>)の分割 |          | Google LLC   |
| 原出願日      | 平成30年1月31日(2018.1.31)               |          | アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94<br>043 マウンテン ビュー アンフィシ<br>アター パークウェイ 1600    |
| (65)公開番号  | 特開2024-95690(P2024-95690A)          |          | 1600 Amphitheatre P<br>arkway 94043 Mounta<br>in View, CA U.S.A. |
| (43)公開日   | 令和6年7月10日(2024.7.10)                | (74)代理人  | 110001195  |
| 審査請求日     | 令和6年4月16日(2024.4.16)                |          | 弁理士法人深見特許事務所   |
|           |                                     | (72)発明者  | ニウ, ユエチェン  |
|           |                                     |          | アメリカ合衆国、94043 カリフォ<br>ルニア州、マウンテン・ビュー、アンフ<br>ィシアター・パークウェイ、1600    |
|           |                                     |          | 最終頁に続く   |

(54)【発明の名称】 量子ゲートを実現するための万能制御

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

1つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートを実現するための方法であって、  
前記ユニタリ量子ゲートのための予め定められた制御パルスを表わすデータを取得する  
ステップを含み、前記予め定められた制御パルスは、

前記ユニタリ量子ゲートを実現する時間依存ハミルトニアン発展時の量子ビットリー  
クを表わす量子ビットリークペナルティ項を含む万能量子制御コスト関数に依存し、

リークエラーが減少した前記万能量子制御コスト関数の制御コストを生成する前記時  
間依存ハミルトニアン発展のパラメータの調整された値を含み、前記方法はさらに、

前記1つ以上の量子ビットに前記予め定められた制御パルスを印加して前記ユニタリ量  
子ゲートを実現するステップを含む、方法。

10

## 【請求項2】

前記万能量子制御コスト関数は、制御制約ペナルティ項をさらに含む、請求項1に記載  
の方法。

## 【請求項3】

前記万能量子制御コスト関数は、総ランタイムペナルティ項をさらに含む、請求項1ま  
たは2に記載の方法。

## 【請求項4】

前記時間依存ハミルトニアン発展の前記パラメータの前記調整された値は、総量子ゲー  
トランタイムが減少した前記万能量子制御コスト関数の制御コストを生成する、請求項3

20

に記載の方法。

【請求項 5】

前記万量子制御コスト関数は、ゲート忠実度ペナルティ項をさらに含む、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

前記時間依存ハミルトニアン発展の前記パラメータの前記調整された値は、量子ゲート忠実度が高められた前記万量子制御コスト関数の制御コストを生成する、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記万量子制御コスト関数は、  
コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項と、  
インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項とを含み、  
前記量子ビットリークペナルティ項は、前記コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項と前記インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項との合計を含む、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【請求項 8】

インコヒーレントリークは、時間依存ハミルトニアン発展時の断熱性の破れに起因するリークを含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

コヒーレントリークは、量子ビットの計算エネルギー状態と、より高いエネルギー状態との間の直接結合に起因するリークを含む、請求項 7 または 8 に記載の方法。

20

【請求項 10】

コヒーレントリークおよびインコヒーレントリークは、ともにオン共鳴周波数リークおよびオフ共鳴周波数リークを含む、請求項 7 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 11】

1 つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートを実現するための装置であって、  
1 つ以上の古典プロセッサと、  
前記 1 つ以上の古典プロセッサとデータ通信可能な量子デバイスとを備え、  
前記装置は動作を実行するように構成され、前記動作は、  
前記ユニタリ量子ゲートのための予め定められた制御パルスを表わすデータを取得することを含み、前記予め定められた制御パルスは、  
前記ユニタリ量子ゲートを実現する時間依存ハミルトニアン発展時の量子ビットリークを表わす量子ビットリークペナルティ項を含む万量子制御コスト関数に依存し、  
リークエラーが減少した前記万量子制御コスト関数の制御コストを生成する前記時間依存ハミルトニアン発展のパラメータの調整された値を含み、前記動作はさらに、  
前記 1 つ以上の量子ビットに前記予め定められた制御パルスを印加して前記ユニタリ量子ゲートを実現することを含む、装置。

30

【請求項 12】

前記量子デバイスは、  
1 つ以上の量子ビットと、  
1 つ以上の制御パルス駆動ラインと、  
1 つ以上のカプラとを含み、各カプラは、対応する量子ビットを制御パルス駆動ラインに結合し、前記量子デバイスはさらに、  
前記 1 つ以上の制御パルス駆動ライン上の制御パルスを生成するように構成された制御パルス発生器を含む、請求項 11 に記載の装置。

40

【請求項 13】

前記 1 つ以上の量子ビットは、超伝導量子ビットを含む、請求項 12 に記載の装置。

【請求項 14】

前記万量子制御コスト関数は、制御制約ペナルティ項をさらに含む、請求項 11 ~ 13 のいずれか 1 項に記載の装置。

50

## 【請求項 15】

前記万能量子制御コスト関数は、総ランタイムペナルティ項をさらに含む、請求項 11 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の装置。

## 【請求項 16】

前記時間依存ハミルトニアン発展の前記パラメータの前記調整された値は、総量子ゲートランタイムが減少した前記万能量子制御コスト関数の制御コストを生成する、請求項 15 に記載の装置。

## 【請求項 17】

前記万能量子制御コスト関数は、ゲート忠実度ペナルティ項をさらに含む、請求項 11 ~ 16 のいずれか 1 項に記載の装置。

10

## 【請求項 18】

前記時間依存ハミルトニアン発展の前記パラメータの前記調整された値は、量子ゲート忠実度が高められた前記万能量子制御コスト関数の制御コストを生成する、請求項 17 に記載の装置。

## 【請求項 19】

前記万能量子制御コスト関数は、  
コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項と、  
インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項とを含み、  
前記量子ビットリークペナルティ項は、前記コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項と前記インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項との合計を含む、請求項 11 ~ 18 のいずれか 1 項に記載の装置。

20

## 【請求項 20】

インコヒーレントリークは、時間依存ハミルトニアン発展時の断熱性の破れに起因するリークを含み、  
コヒーレントリークは、量子ビットの計算エネルギー状態と、より高いエネルギー状態との間の直接結合に起因するリークを含み、  
コヒーレントリークおよびインコヒーレントリークは、ともにオン共鳴周波数リークおよびオフ共鳴周波数リークを含む、請求項 19 に記載の装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【背景技術】

30

## 【0001】

## 背景

本明細書は、量子計算に関する。

## 【0002】

大型量子コンピュータは、ある種類の難問を高速で解ける可能性がある。ゲートモデル量子コンピュータにおいては、一連の万能量子ゲート（その各々が量子コンピュータの発展の経過を規定する）を実現することによって計算タスクを実行する。ある量子デバイスが持つ計算能力は、量子ゲートの実行が高速化すればするほど高まる。

## 【発明の概要】

## 【課題を解決するための手段】

40

## 【0003】

## 概要

本明細書では、任意の量子論理ゲートを実現する際の万能制御のための方法およびシステムについて記載する。

## 【0004】

概して、本明細書に記載の主題の 1 つの革新的な態様は、1 つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートを実現するための方法で実現することができる。この方法は、ユニタリ量子ゲートのための制御パルスを設計する動作を含む。制御パルスを設計する動作は、万能量子制御コスト関数を定義する動作を含む。制御コスト関数は、ユニタリ量子ゲートを実現する時間依存ハミルトニアン発展時のすべての周波数成分にわたる  $i$ ) コヒーレ

50

ント量子ビットリークと、 $i i$ ) インコヒーレント量子ビットリークとを表わす量子ビットリークペナルティ項を含む。制御パルスを設計する動作はさらに、リークエラーが減少するように、制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させる動作を含む。上記方法はさらに、調整されたパラメータを用いて制御パルスを生成する動作と、上記1つ以上の量子ビットに制御パルスを印加してユニタリ量子ゲートを実現する動作とを含む。

【0005】

この態様の他の実現例は、上記方法の動作を実行するように構成された、対応する古典または量子コンピュータシステム、装置、および、1つ以上のコンピュータ記憶装置に記録されたコンピュータプログラムを含む。1つ以上のコンピュータのシステムは、当該システム上にインストールされたソフトウェア、ファームウェア、ハードウェア、またはこれらの組み合わせが動作中にシステムに動作を実行させることによって、特定の操作または動作を実行するように構成され得る。1つ以上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当該装置に動作を実行させる命令を含むことによって、特定の操作または動作を実行するように構成され得る。

10

【0006】

上記の実現例および他の実現例は、オプションとして下記の特徴のうちの1つ以上を単独または組み合わせて含み得る。ある実現例では、万能制御コスト関数は、制御制約ペナルティ項をさらに含む。

【0007】

ある実現例では、万能制御コスト関数は、総ランタイムペナルティ項をさらに含む。

ある実現例では、時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整するステップは、総量子ゲートランタイムが減少するように、制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させるステップを含む。

20

【0008】

ある実現例では、万能制御コスト関数は、ゲート忠実度ペナルティ項をさらに含む。

ある実現例では、時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整するステップは、量子ゲート忠実度が高まるように、制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させるステップを含む。

【0009】

ある実現例では、万能量子制御コスト関数を定義するステップは、直接結合リークエラーを第2の任意の所定のオーダーに抑えた有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を生成するステップと、生成された有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を用いて、コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項を決定するステップと、生成された有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を用いて、インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項を決定するステップと、量子ビットリークペナルティ項を、オン共鳴周波数成分およびオフ共鳴周波数成分の両方のコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項とインコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項との合計として定義するステップとを含む。

30

【0010】

ある実現例では、有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を生成するステップは、直接結合量子ビットリークを第2の任意の所定のオーダーに抑えるように時間依存  $Schrieffer-Wolff$  変換を一般化するステップを含む。一般化するステップは、1つ以上の量子ビットを特徴付けるハミルトニアンを複数の成分に分離するステップを含む。複数の成分は、異なる量子ビットエネルギー部分空間の間の時間依存結合を表わす第1の成分を含む。ハミルトニアンは複数の基礎状態に関して表わされる。一般化するステップはさらに、 $Schrieffer-Wolff$  変換を実行してハミルトニアン基礎状態を回転させることによって、有効ハミルトニアンを定義するステップを含む。有効ハミルトニアンは反エルミート回転演算子を含む。一般化するステップはさらに、回転演算子の第2の所定のオーダーの解を決定して、直接結合リークエラーを第2の所定のオーダーに抑

40

50

えた有効ハミルトニアンブロック非対角成分を生成するステップを含む。オプションとして、所定のオーダーは2次のオーダーである。

【0011】

ある実現例では、複数の成分はさらに、ハミルトニアン時間非依存部分を表わす第2の成分と、各量子ビットエネルギー部分空間内の時間依存結合を表わす第3の成分とを含む。

【0012】

ある実現例では、各量子ビットエネルギー部分空間は、十分に大きいエネルギーギャップを隔てて他の量子ビットエネルギー部分空間から離れている。

【0013】

ある実現例では、決定された回転演算子の第2の所定のオーダーの解は、摂動解を含む。

10

【0014】

ある実現例では、生成された有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を用いてコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項を決定するステップは、有効ハミルトニアンブロック非対角成分に起因する計算エネルギー部分空間の外側のすべての量子ビット状態の振幅の合計を求めるステップを含む。

【0015】

ある実現例では、オフ共鳴の場合、コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項は、有効ハミルトニアンのブロック非対角成分のフロベニウスノルムによって上に有界である。

【0016】

20

ある実現例では、生成された有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を用いてインコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項を決定するステップは、断熱定理の適用を純粋状態からエネルギー部分空間に一般化し、それによって、時間依存ハミルトニアン発展が異なるエネルギー部分空間内、および異なるエネルギー部分空間の間で起こることを可能にするステップと、一般化された断熱定理を用いて、インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項を決定するステップとを含む。

【0017】

ある実現例では、オフ共鳴周波数領域ではコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項が支配的であり、オン共鳴周波数領域ではインコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項が支配的である。

30

【0018】

ある実現例では、インコヒーレントリークは、時間依存ハミルトニアン発展時の断熱性の破れに起因するリークを含む。

【0019】

ある実現例では、コヒーレントリークは、量子ビットの計算エネルギー状態と、より高いエネルギー状態との間の直接結合に起因するリークを含む。

【0020】

ある実現例では、コヒーレントリークおよびインコヒーレントリークは、ともにオン共鳴周波数リークおよびオフ共鳴周波数リークを含む。

【0021】

40

ある実現例では、リークエラーが減少するように制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させるステップは、最適化手法を適用するステップを含む。

【0022】

ある実現例では、上記1つ以上の量子ビットは、超伝導量子ビットを含む。

【発明の効果】

【0023】

本明細書に記載の主題は、以下の利点のうちの1つ以上を達成するような特定の方法で実現することができる。

【0024】

50

本明細書に記載の万能制御を用いて量子ゲートを実現するシステムは、量子コンピューティングデバイスまたはハイブリッド古典 - 量子コンピューティングデバイスの機能性および計算効率を向上させることができる。例えば、本明細書に記載の手法を実施する量子コンピューティングデバイスは、エラーが減少し、必要なランタイムが短縮され、かつ量子ゲート忠実度が高められた量子ゲートを実現することができる。別の一例として、量子ゲートランタイムと忠実度との間の最適なバランスを決定することができる。さらに、短縮されたゲートランタイムで高忠実度量子ゲートを実現することにより、近い将来の量子コンピューティングデバイスは、古典コンピュータでは手の届かない難問を解くのに使用できる可能性がある。さらに、本明細書に記載の手法の万能性によって、量子デバイスの可制御性が向上する。

10

**【 0 0 2 5 】**

本明細書に記載の万能制御を用いて量子ゲートを実現するシステムは、高忠実度量子ゲートの実現に要する計算リソースおよび計算時間を減らすことができる。例えば、制御パルスを用いて量子ゲートを実現する形にペナルティを科す万能コスト関数を設計することによって、関連する量子制御最適化手順を大幅に簡素化することができる。なぜなら、スカラー関数を最小化することは、時間依存量子系のシュレーディンガー方程式およびその環境によって支配される高次元のユニタリ発展を直接最適化するよりも、必要な計算リソースが少なく、プロセスが高速だからである。

**【 0 0 2 6 】**

本明細書に記載の万能制御を用いて量子ゲートを実現するシステムは、包括的な時間依存ハミルトニアン発展時のさまざまな周波数領域にわたるあらゆる種類のリークエラーを抑えることができ、1つの原因に起因するリークエラーを抑えることにとどまらない。その上、量子制御の万能性を損なう厳しい制約をハミルトニアン変調の許容形態に加えることを要せずに、あらゆる種類のリークエラーを抑えることができる。

20

**【 0 0 2 7 】**

本明細書に記載の万能制御を用いて量子ゲートを実現するシステムは、任意のユニタリシングル量子ビットゲートおよび任意のユニタリマルチ量子ビットゲートを実現することができる。

**【 0 0 2 8 】**

便宜上、本明細書に記載の手法は、1つ以上の量子ビットに関する1つの量子ゲートを実現するものとして説明する。しかしながら、記載されるシステムおよび手法の適用は、完全に拡張可能であり、一連の量子ゲートを実現するように拡大してもよい。その場合、一連のゲートを実現するために用いるそれぞれの制御を融合して単一の制御とすることも可能である。これにより、計算を高速化し、同時に一連のゲートの忠実度を高めることができる。

30

**【 0 0 2 9 】**

本明細書に記載の手法は、断熱定理を純粋状態からエネルギー部分空間に一般化することを含む。これにより、異なる部分空間内、および異なる部分空間の間の両方において、時間依存ハミルトニアン発展が起こることが可能になる。一般化された断熱定理は、異なる部分空間の間のポピュレーション移動の算出を必要とするさまざまな例に適用され得る。例えば、リークの推定、トンネルレートの算出、および断熱量子アルゴリズム設計などがある。

40

**【 0 0 3 0 】**

本明細書の主題の1つ以上の実現例の詳細については、添付図面および下記の記載で説明する。主題の他の特徴、態様、および利点については、明細書、図面、および特許請求の範囲から明らかになるであろう。

**【 図面の簡単な説明 】****【 0 0 3 1 】**

【 図 1 】 高忠実度量子ゲートを実現するための例示的なデバイスを示す図である。

【 図 2 】 1つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートを実現するための例示的なブ

50

ロセスを示すフロー図である。

【図3】万能量子制御コスト関数における量子ビットリークペナルティ項を定義するための例示的なプロセスを示すフロー図である。

【図4】直接結合量子ビットリークを任意の所定のオーダーに抑えるように時間依存 *Schrödinger-Wolff* 変換を一般化する例示的なプロセスを示すフロー図である。

【発明を実施するための形態】

【0032】

さまざまな図において、同様の参照番号および呼称は同様の要素を指す。

詳細な説明

よく起こるノイズおよび散逸が原因で、既存の量子コンピュータでは、訂正不能なエラーが始まるまでの動作時間がわずかしかたないため、埋め込まれた量子情報が破壊されてしまう。ゲートモデル量子計算では、一連の万能量子ゲート（その各々が量子コンピュータの発展の経過を規定する）によって計算タスクが実行される。一般的に、量子コンピュータが持つ計算能力は、1つまたは一連の量子ゲートの実行が高速化すればするほど高まる。

10

【0033】

量子ゲートの実行時間の短縮を妨げる主な障害は、リークエラーである。リークエラーは、量子ビットの状態に符号化された量子情報が、予め定められた計算部分空間からより高次元の部分空間へリークすることとして定義され得る。

【0034】

リークエラーには、明確に区別される2つの原因がある。すなわち、コヒーレント (coherent) リークエラーおよびインコヒーレント (incoherent) リークエラーである。コヒーレントリークエラーは、量子ビットの計算部分空間と、より高次元の部分空間との間の直接結合に起因して起こる。インコヒーレントリークエラーは、断熱の条件が許すよりも短い時間間隔でシステムハミルトニアンが変調されることに起因して起こる。例えば、超伝導量子ビットアーキテクチャでは、典型的には、対応するシステムハミルトニアンの連続変調によって量子ゲートが実現される。量子ゲートの高速化を実現するための直観的な1つのアプローチは、量子系の変調を大きくすることである。しかしながら、変調を大きくすると、より多くのエネルギーが量子コンピュータに送り込まれることになる。これにより、量子系の量子状態が、予め定められた計算部分空間の外側の、より高いエネルギー状態に励起される可能性が高まり、インコヒーレントリークエラーの発生につながる。リークエラーの上記両方の原因は、周波数成分が量子ビット状態と、より高い励起状態との間のエネルギーギャップに等しい (オン共鳴: on-resonant) か等しくない (オフ共鳴: off-resonant) か否かに応じて、オン共鳴周波数の寄与およびオフ共鳴周波数の寄与にさらに分類することができる。

20

30

【0035】

リークエラーを特徴付け、排除するための従来の手法では、リークエラーの上記2つの異なる原因が別々に考慮される。例えば、コヒーレントリークエラーおよびインコヒーレントリークエラーを特徴付け、排除するための公知の手法としては、ハミルトニアン変調の許容形態に厳しい制約を加えるものがある。オン共鳴インコヒーレントリークを回避するためには、量子ゲートを実現する制御パルスについて、望ましくない周波数成分を取り除くように特定の機能的基準を選択する場合がある。直接結合リークを回避するためには、2量子ビットのもつれ (entangling) ゲートを実現する際に、計算部分空間を近接のより高いエネルギー準位に結合させるマイクロ波制御をオフにする場合がある。しかしながら、これらの手法では、量子制御の万能性が損なわれる。すなわち、時間依存ハミルトニアン発展の単一の制御では、任意のユニタリゲートをシミュレートすることはできない。コヒーレントリークエラーまたはインコヒーレントリークエラーを抑えるための別の公知の手法は、*Schrödinger-Wolff* 変換 (SWT) または時間依存 SWT (TSWT) の適用によるシステムハミルトニアンの摂動対角化に基づくものである。

40

【0036】

リークエラーは排除することが難しい。なぜなら、量子ゲート忠実度と量子操作ランタ

50

イムとの間の根本的なトレードオフがあるからであり、加えて、上記両方の原因に起因する総リークエラーを説明する統一的な測定基準が現時点では無いからである。そのような総リークエラーの万能な測定基準がなければ、高忠実度かつ高速な量子ゲートのために最適な量子制御方式を直接的に設計することが困難である。

#### 【0037】

本明細書では、量子ゲート忠実度を高めながら、さまざまな周波数領域にわたって量子ゲート時間、および上記両方の原因によるリークエラーを減少させるための方法およびシステムを記載する。特に、任意のユニタリゲートをシミュレートするための量子制御の可能性を保証しながら、総リークエラー、量子ゲート時間、および量子ゲート非忠実度にペナルティ項という形で緩やかな制約を加える万能制御コスト関数について記載する。

10

#### 【0038】

万能制御コスト関数は、総リークエラーに境界をつける。総リーク境界（本明細書では、時間依存 Schrieffer-Wolff 変換に基づくリーク境界 (TSWTLB) と呼ぶ) は、一般化された時間依存 Schrieffer-Wolff 変換 (TSWT) の展開によって表現される。TSWTLB は、時間依存ハミルトニアン発展の全体を通じてオン共鳴結合およびオフ共鳴結合の両方によって生じる直接結合 (コヒーレント) リークエラーおよび非断熱 (インコヒーレント) リークエラーの両方に上界を設けつつ、計算部分空間と望ましくないより高いエネルギー部分空間との間の好都合な仮想遷移を利用する。

#### 【0039】

このようなリーク境界を得るために、一般化された時間依存 Schrieffer-Wolff 変換 (TSWT) が表現され、その解が任意の所定のオーダー (例えば、2 次のオーダー) まで与えられる。一般化された TSWT は、直接結合リークエラーが上記所定のオーダーに抑えられた、より高次元の部分空間でサポートされる、回転基底を提供する。このような回転基底は、量子制御手順の始めと終わりの量子ビット基底に合致するため、状態初期化および読み出しを便利にする。直接結合リークに対応する第 1 のリーク境界は、一般化された TSWT を用いて表現される。

20

#### 【0040】

第 2 のリーク境界は、断熱定理を純粋状態からエネルギー部分空間に一般化することによって表現される。これにより、異なる部分空間内、および異なる部分空間の間の両方において、時間依存ハミルトニアン発展が起こることが可能になる。一般化された断熱定理によって、包括的な時間依存ハミルトニアン発展時の TSWT 基底の非断熱 (インコヒーレント) リークエラーに上界が設けられる。

30

#### 【0041】

直接結合リークエラーはオフ共鳴周波数成分によって左右され、非断熱リークエラーはオン共鳴周波数成分によって左右されるので、第 1 のリーク境界および第 2 のリーク境界を万能コスト関数に組み込むことによって、オフ共鳴リーク関与およびオン共鳴リーク関与の両方によって生じるリークエラーのすべての原因について上界を設けることができる。

#### 【0042】

万能コスト関数は、量子系の可制御性を高めることができる。また、万能コスト関数により、ハミルトニアン発展の単一の連続的な制御で、任意のユニタリ変換のシミュレーションを行なうことが可能になる。したがって、一連の量子ゲートのための多数の制御を融合して単一の制御とすることによって量子計算の速度を上げることができ、同時に全体の忠実度を向上させることができる。

40

#### 【0043】

##### 動作環境の例

図 1 は、万能制御で任意の量子ゲートを実現するための例示的なシステム 100 を示す。例示的なシステム 100 は、1 つ以上の場所における 1 つ以上の古典コンピュータ上または量子コンピューティングデバイス上に古典または量子コンピュータプログラムとして実現されたシステムの一部である。システム 100 において、以下で説明するシステム、構成要素、および手法を実現することができる。

50

## 【0044】

システム100は、古典プロセッサ104とデータ通信可能な量子ハードウェア102を含む。システム100は、古典プロセッサ104および量子ハードウェア102を用いて、古典計算および量子計算を実行するように構成されている。

## 【0045】

量子ハードウェア102は、1つ以上の量子ビット106を含む。量子ビット106は、効率良く初期状態に作成されるとともに量子ゲートの適用によって操作され得る量子ビットを含み得る。量子ハードウェア102に含まれる量子ビットの物理的な実現例の種類は、さまざまなものであり得る。例えば、ある実現例では、量子ハードウェア102は、超伝導量子ビット（例えば、超伝導荷電量子ビット、超伝導流束量子ビット、または超伝導位相量子ビット等）を含み得る。他の実現例では、量子ハードウェア102は、スピン（例えば、電子スピン、核スピン、または原子スピン等）によって実現される量子ビットを含み得る。一般的に、量子ビット106は、周波数が調節可能であり得る。

10

## 【0046】

図4を参照して以下で詳述するように、量子ビット106は、各量子ビットエネルギー部分空間が他の量子ビットエネルギー部分空間から十分に大きいエネルギーギャップを隔てるように設計されてもよい。

## 【0047】

量子ハードウェア102は、量子ビット周波数制御ラインのセット（例えば、各量子ビット周波数制御ラインは、個別の量子ビットに対応）を含み得る。量子ビット周波数制御ラインは、量子ビット106の周波数を制御する（例えば、各量子ビット周波数制御ラインは、対応する量子ビットの周波数を制御）。

20

## 【0048】

量子ハードウェア102は、1つ以上の励起駆動ライン（driveline）を含み得る。便宜上、1つの駆動ライン（例えば、駆動ライン108）を図1に示しているが、ある実現例では、量子ハードウェアは複数の駆動ライン（例えば、量子ビット106の各々に1つの駆動ラインに対応）を含み得る。1つ以上の励起駆動ラインは、量子ビット106の励起制御を提供する。1つ以上の励起駆動ラインは、量子ゲートごとに異なる周波数で、励起パルス（本明細書では制御パルスともいう。例えば、制御パルス108。）を実行するように構成されてもよい。各量子ビットは、1つ以上の励起駆動ライン上で、その周波数に対して近づいたり離れたりするよう調節されてもよい。

30

## 【0049】

量子ハードウェア102は、カブラのセットを含み得る。カブラのセットのうちの各々のカブラは、対応する量子ビットを励起駆動ラインに結合する。カブラは、如何なる種類のカブラであってもよい（例えば、容量性カブラ）。容量性カップリングを実現するために、量子ビットコンデンサに近接してマイクロ波ラインを走らせてもよい。

## 【0050】

量子ハードウェア102は、量子ビット制御デバイス110を含む。制御デバイス110は、1つ以上の量子ビット106を操作するように構成されたデバイスを含む。例えば、制御デバイス110は、量子論理ゲートを実現するためのハードウェア（例えば、1つ以上の励起駆動ライン上で実行される励起パルスを生成する制御パルス発生器112）を含み得る。ある実現例では、制御パルス発生器112はマイクロ波制御デバイスであってもよい。さらに、制御デバイス112は、1つ以上の量子ビット106に関する測定を行なうためのハードウェア（例えば、発振器）を含み得る。

40

## 【0051】

古典プロセッサ104は、量子制御最適化手順を実施するように構成されている。特に、古典プロセッサ104は、それぞれの量子ゲートを実現するための制御パルスを設計するように構成されている。例えば、古典プロセッサ104は、1つの特定のユニタリ量子ゲートまたは一連の複数のユニタリ量子ゲートを特定するデータ（例えば、入力データ114）を受信し得る。そうすると、古典プロセッサ104は制御パルスを設計し得る。こ

50

の制御パルスは、量子ビット制御デバイス 110（例えば、制御パルス発生器 112）によって生成され、量子ビット 106 のうちの 1 つ以上に印加され得るものである。

【0052】

古典プロセッサ 104 によって設計された制御パルスを用いることにより、リークエラーが抑制された任意のユニタリ量子ゲートを実現し得る。また、ある場合には、古典プロセッサ 104 によって設計された制御パルスを用いることにより、リークエラーの抑制に加えて、ゲート忠実度の向上または総ゲート時間の減少のうちの 1 つ以上を伴った任意のユニタリ量子ゲートを実現し得る。

【0053】

このような制御パルスを設計するために、古典プロセッサ 104 は、対応する 1 つの量子ゲートまたは一連の量子ゲートのための万能量子制御コスト関数を定義する万能コスト関数発生器 118 を含む。万能量子制御コスト関数は、ユニタリ量子ゲートを実現するために用いる制御パルスの形についてのペナルティ項を含む。ペナルティ項は、ユニタリ量子ゲートを実現する 1 つまたは複数の量子ビットの時間依存ハミルトニアン発展時のコヒーレント量子ビットリークおよびインコヒーレント量子ビットリークの両方を表わす量子ビットリークペナルティ項を含む。ペナルティ項は、制御制約ペナルティ項、総ゲートランタイムペナルティ項、またはゲート非忠実度項をさらに含んでもよい。このような万能量子制御コスト関数の形態については、図 2 ~ 図 4 を参照して以下で詳述する。

10

【0054】

古典プロセッサ 104 は、リークエラーが減少するように、また、オプションとしてゲート非忠実度および総ゲート時間が減少するように、定義された万能量子制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させる。例えば、古典プロセッサ 104 は、制約を満たしながら対象物を最大化または最小化する機能を提供する 1 つ以上の最適化ツールボックスを含み得る。例えば、線形計画法、二次計画法、非線形計画法、制約付き線形最小二乗法、非線形最小二乗法、または非線形方程式のためのソルバなどである。

20

【0055】

このような最適化プロセスによって得られる調整されたパラメータにより、制御パルスが特定される。古典プロセッサ 104 は、設計された制御パルスを特定するデータ（例えば、出力データ 116）を量子ハードウェア 102 に送信する。1 つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートを実現するための例示的なプロセスについては、図 2 ~ 図 4 を参照して以下で詳述する。

30

【0056】

ハードウェアのプログラム

図 2 は、1 つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートを実現するための例示的なプロセス 200 を示すフロー図である。便宜上、プロセス 200 は、1 つ以上の場所に位置する 1 つ以上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行されるものとして説明する。例えば、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 が、プロセス 200 を実行し得る。

【0057】

【数 1】

40

システムは、ユニタリ量子ゲートのための制御パルスを設計する（ステップ202）。ユニタリ量子ゲートは、1つの量子ビットを操作するシングル量子ビットゲートであってもよいし、または複数の量子ビットを操作するマルチ量子ビットゲートであってもよい。図1を参照して上述したように、ユニタリ量子ゲートを実現するために、制御パルスは、下記の数式（1）で与えられるユニタリ変換  $U(T)$  に従って、1つ以上の量子ビットを特徴付けるハミルトニアンを変調し得る。

$$U(T) = \mathcal{T} \left[ \exp \left( -i \int_0^T \hat{H}(t) dt \right) \right] \quad (1) \quad 10$$

【0058】

【数2】

数式（1）において、 $\mathcal{T}$  は時間順序を表わし、 $T$  は総ゲート時間を表わし、 $\hat{H}(t)$  は1つ以上の量子ビット特徴付けるハミルトニアン（本明細書では、システムハミルトニアンともいう）を表わす。例えば、プロセス200を用いて超伝導量子ビット（例えば、gmon超伝導量子ビット）における任意のシングル量子ビットゲートを実現する場合、ハミルトニアン（回転波近似の適用後）は、下記の数式（2）によって与えられ得る。

$$\hat{H}_g(t) = \frac{\eta}{2} \hat{n}(\hat{n} - 1) + \delta(t) \hat{n} + i f(t) (\hat{a} e^{-i\phi(t)} - \hat{a}^\dagger e^{i\phi(t)}) \quad (2) \quad 20$$

【0059】

【数3】

数式（2）において、 $\eta$  はジョセフソン接合の非調和性を表わす。 $\hat{n}$  は数演算子を表わす。 $\hat{a}$  は消滅演算子を表わす。 $\delta(t)$  は量子ビット離調を表わす。 $f(t)$  は振幅を表わす。 $\phi(t)$  は制御パルスの位相を表わす。 $\delta(t), f(t)$  および  $\phi(t)$  は連続的に変調することができる。各発振器の2つの最も低いエネルギー準位によって張られる部分空間が、量子ビット論理部分空間  $\mathcal{H}_2 = \text{Span}\{|0\rangle, |1\rangle\}$  に選ばれる。 $|n\rangle$  は、所定のモードにおいて  $n$  個が励起したフォック状態を表わす。

【0060】

【数4】

ユニタリ変換  $U(T)$  に従ったシステムハミルトニアンの変調によってユニタリ量子ゲートを実現する際に、リークエラーが生じる可能性がある。リークエラーという用語は、予め定められた計算部分空間の外側の、より高いエネルギー状態へ、量子情報がリークすることを指す。図1を参照して上述したように、リークエラーには2つの原因がある。1つは量子ビットの計算エネルギー状態と、より高いエネルギー状態との間の直接結合に起因するコヒーレントリークエラーであり、もう1つは時間依存ハミルトニアン発展時の断熱性の破れに起因するインコヒーレントリークエラーである。これらの両方の種類のリークエラーは、さらにオン共鳴周波数リークおよびオフ共鳴周波数リークに分類することができる。

【0061】

10

20

30

40

50

## 【数 5】

上述の例の説明を続けると、ハミルトニアン  $\hat{H}_g(t)$  を変調する際のリークエラーの主要な原因は、ハミルトニアン  $\hat{H}_g(t)$  を3つの別々の成分  $\hat{H}_g(t) = \hat{H}_0(t) + \hat{H}_1(t) + \hat{H}_2(t)$  に分解することによって識別することができる。第1の項は、ハミルトニアン の時間非依存部分を表わす。

$$\hat{H}_0(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\eta}{2} \hat{n}(\hat{n} - 1) |n\rangle\langle n|$$

10

第2の項は、量子ビット計算部分空間内の時間依存ハミルトニアン結合を表わす。

$$\hat{H}_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t) n |n\rangle\langle n| + if(t) (|0\rangle\langle 1| e^{-i\phi(t)} - |1\rangle\langle 0| e^{i\phi(t)})$$

第3の項は、量子ビット計算部分空間を、より高いエネルギー部分空間に結合させる制御パルス（例えば、マイクロ波制御）を表わす。

20

$$\hat{H}_2(t) = if(t) \sum_{n=1}^{\infty} (|n\rangle\langle n+1| e^{-i\phi(t)} - |n+1\rangle\langle n| e^{i\phi(t)})$$

## 【0062】

## 【数 6】

リークエラーの主要な原因は、第3の項のマイクロ波制御がゼロでないことに起因する。この項は、励起総数を一定に保つことなく、計算状態  $|1\rangle$  を、より高いエネルギー状態  $|2\rangle$  に結合させる。

30

## 【0063】

## 【数 7】

上記リークエラーに起因して、ユニタリ変換  $U(T)$  の結果は、1つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートの意図した動作  $U_{target}$  とは異なる可能性がある。1つ以上の量子ビットに関するユニタリ量子ゲートの意図した動作  $U_{target}$  と、シミュレートされたユニタリ変換  $U(T)$  との間の差は、 $U_{target}$  と  $U(T)$  との間の忠実度によって表わすことができる。忠実度が大きいほど、ユニタリ変換によって実現されるユニタリ量子ゲートが、ユニタリ量子ゲートの理想的な実現に忠実であることを示す。忠実度は、下記の数式 (3) によって与えられる。

40

$$F(U(T)) = \frac{1}{2^2} |\text{Tr}(U^\dagger(T) U_{target})|^2 \quad (3)$$

## 【0064】

システムは、万量子制御コスト関数を定義する（ステップ202a）。万量子制御コスト関数は、制御パルスの形についてのペナルティ項を含む。このようなペナルティ項

50

は、システムの1つ以上の量子ビットの可制御性を高めるとともに、量子制御最適化手順を簡素化しながらユニタリ量子ゲートの実現を可能にする。なぜなら、スカラー関数を最小化することは、時間依存量子系のシュレーディンガー方程式およびその環境によって支配される高次元のユニタリ発展を直接最適化するよりも計算上の負荷が少ないからである。

【0065】

量子情報が環境内で失われる原因となる総リークエラーを抑えるために、万量子制御コスト関数は、ユニタリ量子ゲートを実現する時間依存ハミルトニアン発展時のコヒーレント量子ビットリークおよびインコヒーレント量子ビットリークの両方を表わす量子ビットリークペナルティ項  $L_{TSMTLB}$  を含む。量子ビットリークペナルティ項  $L_{TSMTLB}$  の具体的な形については、図3を参照して以下で詳述する。

10

【0066】

【数8】

各ハミルトニアン発展の始めと終わりにおいて量子ビットを計算基底で好都合に作成および測定するためには、量子ビット計算部分空間内の時間依存ハミルトニアン結合を表わす項、および、量子ビット計算部分空間をより高いエネルギー部分空間に結合させる制御パルスを表わす項（例えば  $g_{m \rightarrow n}$  ハミルトニアンの場合、 $\hat{H}_1(t)$  項および  $\hat{H}_2(t)$  項）が両境界でゼロになり、後述の  $TSM$  変換後の基底と元の量子ビット基底とが合致することが必要である。このような制御制約は、境界制御制約ペナルティ項を総コスト関数に付加することによって実行され得る。例えば、上記の数式(2)で与えられる  $g_{m \rightarrow n}$  ハミルトニアンの場合、システムは、万量子制御コスト関数を、境界制御制約ペナルティ項  $[\delta(t)^2]_{t=0,T} + f(t)^2|_{t=0,T}$  を含むように定義し得る。

20

【0067】

総ユニタリ量子ゲートランタイム  $T$  を減少させるために（これは、近い将来の量子デバイスに望まれる性質である）、万量子制御コスト関数は、総ランタイムペナルティ項をさらに含んでもよい。

【0068】

ゲート非忠実度（すなわち、実際のゲート忠実度と、その最大値1との差）を減少させるために、万量子制御コスト関数は、ゲート忠実度ペナルティ項  $1 - F(U(T))$  をさらに含んでもよい。

30

【0069】

上記  $g_{m \rightarrow n}$  ハミルトニアンの例の説明を続けると、システムによって定義される万量子コスト関数全体は、下記の数式(4)によって与えられ得る。

【0070】

【数9】

$$C(\alpha, \beta, \gamma, \kappa) = \alpha[1 - F(U(T))] + \beta L_{TSMTLB} + \gamma[\delta(t)^2]_{t=0,T} + f(t)^2|_{t=0,T} + \kappa T \quad (4)$$

40

【0071】

数式(4)において、 $\alpha$  はゲート非忠実度にペナルティを科し、 $\beta$  はリーク境界  $L_{TSMTLB}$  からのリークエラー（図3を参照して以下で詳述する）のすべての原因にペナルティを科し、 $\gamma$  はゼロ値境界制約の破れにペナルティを科し、 $\kappa$  は長いゲート時間にペナルティを科す。

【0072】

システムは、リークエラーが減少するように、定義された万量子制御コスト関数に従って、例えばマイクロ波パルスの振幅および位相、またはジョセフソン接合にわたる磁束

50

バイアスを調節することにより、時間依存ハミルトニアン発展のパラメータの制御を調整して制御コストを変化させる（ステップ202b）。例えば、システムは、リークエラーが最小限に抑制されたユニタリ量子ゲートを実現できる制御パルスを定義するような時間依存ハミルトニアン発展の最適パラメータを決定するように、最適化手法（例えば、確率的勾配降下法、微分展開、動的計画法、アニーリングアルゴリズム、モンテカルロ法、および他の機械学習手法などの、従来の最適化ツールボックスに見られる手法）を適用してもよい。

【0073】

制御コスト関数が総ランタイムペナルティ項を含む場合、システムは、リークエラーが減少するように、かつ、総ゲート時間が減少するように、制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させてもよい。例えば、システムは、リークエラーが減少し、かつ総ゲート時間が減少したユニタリ量子ゲートを実現できる制御パルスを定義するような時間依存ハミルトニアン発展の最適パラメータを決定するように、最適化手法を適用してもよい。

10

【0074】

制御コスト関数がゲート非忠実度ペナルティ項を含む場合、システムは、リークエラーが減少するように、かつゲート非忠実度が減少するように（ゲート忠実度が高まるように）、制御コスト関数に従って時間依存ハミルトニアン発展のパラメータを調整して制御コストを変化させてもよい。例えば、システムは、リークエラーが減少し、かつゲート忠実度が高められたユニタリ量子ゲートを実現できる制御パルスを定義するような時間依存ハミルトニアン発展の最適パラメータを決定するように、最適化手法を適用してもよい。

20

【0075】

ある場合には、システムは、リークエラーが減少し、ゲート非忠実度が減少し、かつ総ゲート時間が減少したユニタリ量子ゲートを実現できる制御パルスを定義するような時間依存ハミルトニアン発展の最適パラメータを決定するように、最適化手法を適用してもよい。

【0076】

システムは、調整されたパラメータを用いて制御パルスを生成する（ステップ204）。制御パルスを生成することは、ハミルトニアンによって、所望の制御パルスを、量子系に適用される電子機器を制御する電気信号/磁気信号に変換することを含み得る。

30

【0077】

システムは、1つ以上の量子ビットに制御パルスを印加して、ユニタリ量子ゲートを実現する（ステップ206）。

【0078】

システムハミルトニアンの制御への厳しい制約を、総リークエラー、制御境界条件、総ゲート時間、およびゲート非忠実度への緩やかな制約（量子制御最適化のための万能コスト関数の、対応するペナルティ項という形態）に置き換えることによって、量子ビットの可制御性が向上する。さらに、プロセス200により、ハミルトニアン発展の単一の連続的な制御で、任意のユニタリ変換のシミュレーションを行なうことが可能になる。したがって、ある実現例では、システムは、一連の量子ゲートのための多数の制御を融合して単一の制御とすることによって、システムによる量子計算の実行速度を上げることができ、同時に全体の忠実度を向上させることができる。

40

【0079】

量子ビットリークへのペナルティ

図3は、万能量子制御コスト関数における量子ビットリークペナルティ項を定義するための例示的なプロセス300を示すフロー図である。便宜上、プロセス300は、1つ以上の場所に位置する1つ以上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行されるものとして説明する。例えば、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が、プロセス300を実行し得る。

【0080】

50

## 【数 1 0】

システムは、直接結合リークエラーを任意の所定のオーダーに抑えた有効ハミルトニアンブロック非対角成分を生成する（ステップ 3 0 2）。直接結合リークエラーを所定のオーダーに抑えた有効ハミルトニアンブロック非対角成分  $\hat{\mathbb{H}}_{od}$  を生成することについては、図 4 を参照して以下で詳述する。

## 【0 0 8 1】

## 【数 1 1】

システムは、生成された有効ハミルトニアンブロック非対角成分を用いて、コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{direct}$  を決定する（ステップ 3 0 4）。コヒーレント量子ビットリークは、有効ハミルトニアンブロック非対角成分によって生じる。なぜなら、有効ハミルトニアンブロック非対角成分によって、量子ビット計算エネルギー部分空間がより高いエネルギー部分空間に直接結合するからである。したがって、コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{direct}$  を決定するために、システムは、ブロック対角ハミルトニアン発展  $U_d(t) = \mathcal{T} \left[ e^{-i \int_0^t \hat{\mathbb{H}}_d(\tau) d\tau} \right]$ （ $\mathcal{T}$  は時間順序を表わす）によるシュレーディンガー描像基底初期状態  $|\psi(0)\rangle$  に関する量子状態基底  $|\psi(t)\rangle_t = U_d^{-1}(t)|\psi(0)\rangle$  を用いた相互作用描像を考慮することによって、直接結合  $\|\hat{\mathbb{H}}_{od}\| / \|\hat{\mathbb{H}}_{od}\| \ll \Delta$ （ $\Delta$  は 2 つの最も低いエネルギー固有状態間のエネルギーギャップを表わす）に起因して量子ビット計算部分空間から外に出るポピュレーションを評価する。相互作用描像におけるシュレーディンガー方程式は、下記の数式（5）によって与えられる。

$$i \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle_I = U_d^{-1}(t) \hat{\mathbb{H}}_{od}(t) U_d(t) |\psi(0)\rangle_I,$$

$$|\psi(t)\rangle_I \approx \left[ I - i \int_0^t U_d^{-1}(\tau) \hat{\mathbb{H}}_{od}(\tau) U_d(\tau) d\tau \right] |\psi(0)\rangle$$
(5)

## 【0 0 8 2】

## 【数 1 2】

数式（5）において、 $\|\hat{\mathbb{H}}_{od}\|$  は  $O(\epsilon^3 / \Delta^2)$  のオーダーであるため、初期条件  $|\psi(0)\rangle_I = |\psi(0)\rangle_t$  を用いて時間順序積分の 1 次テイラー展開を行なう。 $U_d(t)$  は計算部分空間を維持するので、システムは、下記の数式（6）で与えられるように、有効ハミルトニアンブロック非対角成分に起因する計算エネルギー部分空間の外側のすべての励起状態の振幅の合計を求めることによって、コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{direct}$  を決定する。

$$L_{direct}(t) = \sum_{\alpha \neq 0, m \in \Omega_\alpha} |\langle m(t) | (U_d(t) |\psi(0)\rangle - U_d(t) |\psi(t)\rangle)_I |$$
(6)

## 【0 0 8 3】

## 【数 1 3】

10

20

30

40

50

システムは、プロパゲータ関係式  $U_d(t) U_d^{-1}(\tau) = U_d(t, \tau)$  を用いて数式 (5) を数式 (6) に挿入するとともに、主要な部分が時間非依存エネルギーギャップによって与えられた対角ユニタリ発展に近似させることによって、上記決定されたコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{direct}$  に境界をつける。システムは、オフ共鳴の場合、有効ハミルトニアンブロック非対角成分のフロベニウスノルムを用いて、 $L_{direct}$  に境界をつける。境界をつけられたコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項は、下記の数式 (7) で与えられる。

$$\begin{aligned}
 L_{direct}(t) &= \sum_{\alpha \neq 0, m \in \Omega_\alpha} |\langle m(t) | (U_d(t) |\psi(0)\rangle - U_d(t) |\psi(t)\rangle)_I | \\
 &\stackrel{\approx 2}{=} \sum_{\alpha \neq 0, m \in \Omega_\alpha} \left| \langle m(t) | \int_0^t U_d(t, \tau) \hat{H}_{od}(\tau) U_d(\tau, t) d\tau |\psi(t)\rangle \right| \\
 &\stackrel{\approx 3}{\approx} \sum_{\alpha \neq 0, m \in \Omega_\alpha} \left| \langle m(t) | \int_0^t e^{-i\Delta_\alpha(t-\tau)} \hat{H}_{od}(\tau) d\tau |\psi(t)\rangle \right| \\
 &\leq \frac{\|\hat{H}_{od}(0)\|}{\Delta(0)} + \frac{\|\hat{H}_{od}(t)\|}{\Delta(t)}
 \end{aligned} \tag{7}$$

図 4 を参照して後述する所定のオーダーの TSWT の後のブロック非対角ハミルトニアンを数式 (8) に挿入することによって、システムハミルトニアンの 1 次導関数および 2 次導関数の両方に依存するリーク境界が与えられる。

【 0 0 8 4 】

【 数 1 4 】

システムは、上記生成された有効ハミルトニアンのブロック非対角成分を用いて、インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{non-adiabatic}$  を決定する (ステップ 306)。インコヒーレント量子ビットリークは、時間依存ハミルトニアン発展時の断熱性の破れによって生じる ( $\|\dot{\hat{H}}_{od}\| / \|\hat{H}_{od}\| \sim \Delta$ )。インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{non-adiabatic}$  を決定するために、システムは、断熱定理の適用を純粋状態からエネルギー部分空間に一般化し、それによって、時間依存ハミルトニアン発展が異なるエネルギー部分空間内、および異なるエネルギー部分空間の間で起こることを可能にする。システムは、上記一般化された断熱定理を用いて、インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項を決定する。

【 0 0 8 5 】

【 数 1 5 】

10

20

30

40

50

上記一般化された断熱定理は、以下のように表現することができる。 $\hat{H}(s)$  を、単位のない尺度変更可能な時間  $s \in [0, 1]$  をパラメータとして 2 回微分可能なハミルトニアンとする。 $\hat{H}(s)$  は、 $\hat{H}(s) = H_0 + \hat{\mathbb{H}}_d(s) + \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)$  の 3 つの部分からなる。 $H_0 = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \sum_{m \in \Omega_{\alpha}} E_{\alpha} |m\rangle \langle m|$  は、最も低いエネルギー部分空間  $\Omega_0$  と、より高い他のエネルギー部分空間との間のエネルギーギャップを、十分に大きい一定のエネルギーギャップとすることを保証する。 $\hat{\mathbb{H}}_d(s)$  は、各非縮退部分空間  $\Omega_{\alpha}$  内の結合に相当する時間依存項である。 $\hat{\mathbb{H}}_{od}(s)$  は、異なる部分空間の間の結合に相当する。エネルギーギャップと部分空間内部／部分空間の間の結合との間の差は、 $\Delta = \min_{\alpha} |E_{\alpha} - E_0| \gg |\hat{\mathbb{H}}_d(s)| \sim |\hat{\mathbb{H}}_{od}(s)| \sim \delta$  によって与えられる。 $|\phi_0(s)\rangle = \sum_{m \in \Omega_0} a_m(s) |m\rangle$  を、物理的時間  $sT$  における最も低いエネルギー部分空間  $\Omega_0$  における瞬間的な固有状態とする。 $|\psi(s)\rangle$  を、合計ハミルトニアン  $\hat{H}(s)$  で時間  $s = 0$  の同一初期状態  $|\phi_0(0)\rangle$  から時間  $s$  まで発展した状態とする。以下の不等式によって、最終的な時間  $T$  における上記 2 つの状態の間の差に境界がつけられる。

10

$$L_{non-adiabatic} \leq \frac{1}{T} \left[ \frac{1}{\Delta^2(s)} \left( \left\| \frac{d\hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds} \right\| + T \left\| [\hat{\mathbb{H}}_d(s), \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)] \right\| \right)_{s=1} + \frac{1}{\Delta^2(s)} \left( \left\| \frac{d\hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds} \right\| + T \left\| [\hat{\mathbb{H}}_d(s), \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)] \right\| \right)_{s=0} \right] \\ + \int_0^1 \frac{5}{\Delta^3(s)} \left( \left\| \frac{d\hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds} \right\| + T \left\| [\hat{\mathbb{H}}_d(s), \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)] \right\| \right)^2 ds \\ + \int_0^1 \frac{1}{\Delta^2(s)} \left( T \left\| [\hat{\mathbb{H}}_d(s), [\hat{\mathbb{H}}_d(s), \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)]] \right\| + 2 \left\| [\hat{\mathbb{H}}_d(s), \frac{d\hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds}] \right\| + 2 \left\| [\frac{d\hat{\mathbb{H}}_d(s)}{ds}, \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)] \right\| + \frac{1}{T} \left\| \frac{d^2 \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds^2} \right\| \right) ds.$$

20

インコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{non-adiabatic}$  への主要な関与は、下記の数式 (8) によって与えられる。

$$L_{non-adiabatic} = \int_0^1 \frac{1}{\Delta^2(s)} \frac{1}{T} \left\| \frac{d^2 \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds^2} \right\| ds \quad (8)$$

30

【 0 0 8 6 】

【 数 1 6 】

オフ共鳴周波数領域  $\left\| \dot{\hat{\mathbb{H}}}_{od} \right\| / \left\| \hat{\mathbb{H}}_{od} \right\| \ll \Delta$  ではコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{direct}$  が支配的であり、オン共鳴周波数領域  $\left\| \dot{\hat{\mathbb{H}}}_{od} \right\| / \left\| \hat{\mathbb{H}}_{od} \right\| \sim \Delta$  ではインコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{non-adiabatic}$  が支配的であるため、システムは、量子ビットリークペナルティ項  $L_{TSWTLB}$  を、コヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{direct}$  とインコヒーレント量子ビットリークペナルティ部分項  $L_{non-adiabatic}$  との合計として定義する (ステップ 308)。量子ビットリークペナルティ項  $L_{TSWTLB}$  は、下記の数式 (9) で与えられる。

40

$$L_{TSWTLB} = \int_0^1 \frac{1}{\Delta^2(s)} \frac{1}{T} \left\| \frac{d^2 \hat{\mathbb{H}}_{od}(s)}{ds^2} \right\| ds + \frac{\left\| \hat{\mathbb{H}}_{od}(0) \right\|}{\Delta(0)} + \frac{\left\| \hat{\mathbb{H}}_{od}(T) \right\|}{\Delta(T)} \quad (9)$$

【 0 0 8 7 】

リークペナルティ項  $L_{TSWTLB}$  により、システムハミルトニアンの形についての厳し

50

い制約を緩和して、万能量子制御コスト関数における緩やかなペナルティ項とすることができる。万能量子制御コスト関数を直接的に最適化することによって、量子系の可制御性を犠牲にすることなく、ゲート忠実度を高めながら、リークエラーおよび総ゲート時間を減少させることができる。

【0088】

時間依存 Schrieffer - Wolf 変換の一般化

図4は、直接結合量子ビットリークを任意の所定のオーダーに抑えるように時間依存 Schrieffer - Wolf 変換を一般化する例示的なプロセス400を示すフロー図である。便宜上、プロセス400は、1つ以上の場所に位置する1つ以上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行されるものとして説明する。例えば、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が、プロセス400を実行し得る。

10

【0089】

システムは、1つ以上の量子ビットを特徴付けるハミルトニアンを複数の成分に分離する(ステップ402)。複数の成分は、異なる量子ビットエネルギー部分空間の間の時間依存結合を表わす第1の成分を含み、ハミルトニアンは複数の基礎状態に関して表わされる。上記複数の成分はさらに、ハミルトニアンの時間非依存部分を表わす第2の成分と、各量子ビットエネルギー部分空間内の時間依存結合を表わす第3の成分とを含み得る。例えば、上記の数式(2)で与えられるハミルトニアンは、以下の3つの成分に分離され得る。

【0090】

20

【数17】

$$\begin{aligned}\hat{H}(t) &= \hat{H}_0 + \hat{H}_1(t) + \hat{H}_2(t), \\ \hat{H}_0 &= \sum_{\alpha} \sum_{m \in \Omega_{\alpha}} E_1 |m\rangle \langle m|, \\ \hat{H}_1(t) &= \sum_{\alpha} \sum_{m \in \Omega_{\alpha}} \langle m | \hat{H}_1^{\alpha}(t) | m' \rangle |m\rangle \langle m'| \\ \hat{H}_2(t) &= \sum_{\alpha \neq \alpha'} \sum_{m \in \Omega_{\alpha}, m' \in \Omega_{\alpha'}} \langle m | \hat{H}_2^{\alpha, \alpha'}(t) | m' \rangle |\alpha, m\rangle \langle \alpha', m'|,\end{aligned}\tag{10}$$

30

$\hat{H}_0(t)$  は、ハミルトニアンの時間非依存部分を表わす。 $\hat{H}_1(t)$  は、各量子ビットエネルギー部分空間内の時間依存結合を表わす(本明細書では、「ブロック対角項」という)。 $\hat{H}_2(t)$  は、異なる量子ビットエネルギー部分空間の間の時間依存結合を表わす(本明細書では、「ブロック非対角項」という)。数式(10)において、 $\alpha \in \{0, 1, 2, \dots\}$  である  $\Omega_{\alpha}$  は異なるエネルギー部分空間を表わし、 $|m\rangle$  は、各同じエネルギー部分空間に広がる直交基底状態を表わす。この時間依存ハミルトニアン発展を通じて、 $m, m' \in \Omega_{\alpha}, l \in \Omega_{\alpha'}, \alpha \neq \alpha'$  のすべてについて、複数の成分の各々の大きさは、以下に従うことを想定する。

$$\Delta = \min_{\alpha \neq 0} |E_{\alpha} - E_0| \gg \left| \langle m | \hat{H}_1^{\alpha}(t) | m' \rangle \right| \sim \left| \langle m | \hat{H}_2^{\alpha, \alpha'}(t) | l \rangle \right| \epsilon$$

40

$\Delta$  および  $\epsilon$  は、 $\epsilon/\Delta \ll 1$  を満たす異なるエネルギースケールを表わす。この想定の下では、各量子ビットエネルギー部分空間  $\Omega_{\alpha}$  は、十分に大きいエネルギーギャップを隔てて、他の空間から離れている。このエネルギーギャップは、部分空間内部の結合よりも実質的に大きい。

【0091】

【数18】

50

システムは、Schrieffer-Wolff変換を実行してハミルトニアン基礎状態を  $|\psi\rangle$  から  $e^{-\hat{S}}|\psi\rangle$  まで回転させることによって、有効ハミルトニアン  $\hat{H}$  を定義する（ステップ404）。この回転基底において、有効ハミルトニアンは以下の数式（11）で与えられる。

$$i\frac{d}{dt}|\bar{\psi}\rangle = \hat{H}|\bar{\psi}\rangle = i\frac{de^{-\hat{S}}}{dt}e^{\hat{S}}|\bar{\psi}\rangle + ie^{-\hat{S}}\frac{d}{dt}|\psi\rangle, \quad (10)$$

$$\hat{H} = -i\sum_{j=0}^{\infty}\frac{1}{(j+1)!}[\dot{\hat{S}}, \hat{S}]_j + e^{-\hat{S}}\hat{H}e^{\hat{S}} \quad (11)$$

数式（11）において、反エルミート回転演算子  $\hat{S}(t)$  は、異なるエネルギー部分空間の間でゼロでない項を含むため、ブロック対角である。

【0092】

【数19】

システムは、回転演算子  $\hat{S}(t)$  の所定のオーダーの解を決定して、直接結合リークエラーを当該所定のオーダーに抑えた有効ハミルトニアン  $\hat{H}$  のブロック非対角成分  $\hat{H}_{od}$  を生成する（ステップ406）。特に、システムは、 $\hat{S}(t)$  の摂動解が  $n$  次のオーダーの場合、有効ハミルトニアンのブロック非対角項が  $O(\epsilon^{n+1}/\Delta^n)$  のオーダーに抑えられるように、ハミルトニアン  $\hat{H}(t)$  をブロック対角化する回転演算子  $\hat{S}(t) = \epsilon\hat{S}_1(t) + \epsilon^2\hat{S}_2(t) + \dots + \epsilon^n\hat{S}_n(t)$  の摂動解を決定する。2次のオーダーのTSWTの後、結合が  $O(\epsilon^4/\Delta^3)$  のオーダーに抑えられた有効ハミルトニアンのブロック非対角成分  $\hat{H}_{od}$  は、下記の数式（12）によって与えられる。

$$\begin{aligned} (\hat{H}_{od})^{\alpha,\alpha'} &= \frac{(\hat{H}_1^\alpha)^2\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'} - 2\hat{H}_1^\alpha\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}\hat{H}_1^{\alpha'} + \hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}(\hat{H}_1^{\alpha'})^2}{(E_{\alpha'} - E_\alpha)^2} \quad (30) \\ &+ \frac{2}{3(E_{\alpha'} - E_\alpha)} \sum_\gamma \left[ \frac{\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}\hat{H}_2^{\alpha',\gamma}\hat{H}_2^{\gamma,\alpha'}}{E_{\alpha'} - E_\gamma} - \frac{\hat{H}_2^{\alpha,\gamma}\hat{H}_2^{\gamma,\alpha}\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}}{E_\alpha - E_\gamma} \right] \\ &- i \left[ \frac{\hat{H}_1^\alpha\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'} + 2\hat{H}_1^\alpha\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'} - 2\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}\hat{H}_1^{\alpha'} - \hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}\hat{H}_1^{\alpha'}}{(E_{\alpha'} - E_\alpha)^2} \right] \\ &- \frac{\hat{H}_2^{\alpha,\alpha'}}{(E_{\alpha'} - E_\alpha)^2} + O\left(\frac{\epsilon^4}{\Delta^3}\right) \quad (40) \end{aligned} \quad (12)$$

【0093】

本明細書に記載のデジタルおよび/または量子の主題、ならびにデジタル機能操作および量子操作の実現例は、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で実現してもよいし、有形に具現化されたデジタルおよび/または量子コンピュータソフトウェアまたはファームウェアで実現してもよいし、本明細書に開示の構造およびその構造的均等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で実現してもよいし、これらのうちの1つ以上の組み合わせで実現してもよい。「量子計

算システム」という用語は、量子コンピュータ、量子情報処理システム、量子暗号化システム、または量子シミュレータを含み得るが、これらに限定されない。

【0094】

本明細書に記載のデジタルおよび/または量子の主題の実現例は、1つ以上のデジタルおよび/または量子コンピュータプログラムとして実現してもよい。すなわち、データ処理装置によって実行される、またはデータ処理装置の操作を制御するための、有形の非一時的な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つ以上のモジュールとして実現してもよい。デジタルおよび/または量子コンピュータ記憶媒体は、機械可読記憶装置、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つ以上の量子ビット、またはこれらのうちの1つ以上の組み合わせであってもよい。代わりに、または加えて、プログラム命令は、人工的に生成されて伝播される信号（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）に符号化され得る（例えば、機械によって生成された電気信号、光信号、または電磁信号など）。このような信号は、適切な受信装置に送信されてデータ処理装置によって実行されるデジタルおよび/または量子情報を符号化するように生成されるものである。

10

【0095】

量子情報および量子データという用語は、量子系によって伝達され、または量子系に保持もしくは格納される情報またはデータを指す。この情報またはデータにおいて、最も小さなゼロでない系は量子ビット、すなわち、量子情報の単位を定義する系である。なお、「量子ビット」という用語は、対応する文脈で2準位系に適切に近似され得るすべての量子系を包含する。このような量子系は、多準位系（例えば、2以上の準位）を含み得る。例として、このような系は、原子、電子、光子、イオン、または超伝導量子ビットを含み得る。多数の実現例では、計算基礎状態を、基底状態および第1の励起状態とする。しかしながら、計算状態をより高い準位の励起状態とするような他の設定も可能であることが理解される。「データ処理装置」という用語は、デジタルおよび/または量子データを処理するためのあらゆる種類の装置、デバイス、およびマシンを包含する。例えば、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、ならびにこれらの組み合わせ等が含まれる。装置は、専用論理回路（例えば、FPGA（field programmable gate array）、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、特定の量子系に関する情報をシミュレートまたは生成するように設計された量子データ処理装置）であってもよいし、これらをさらに含んでもよい。特に、量子シミュレータは、万能量子計算を実行する機能を有し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、オプションとして、デジタルおよび/または量子コンピュータプログラムのための実行環境を作り出すコードを含み得る。例えば、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、またはこれらのうちの1つ以上の組み合わせを構成するコード等である。

20

30

【0096】

デジタルコンピュータプログラム（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、または記載される場合もある）は、コンパイラ型言語もしくはインタ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込むことができ、スタンドアロンプログラムとして、または、モジュール、コンポーネント、サブルーチン、もしくはデジタル計算環境で使用するのに適した他のユニットとして等、任意の形態でデプロイすることができる。量子コンピュータプログラム（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、または記載される場合もある）は、コンパイラ型言語もしくはインタ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込むことができ、適切な量子プログラミング言語に変換または量子プロ

40

50

グラミング言語（例えば、QCLまたはQuipper）で書き込むことができる。

【0097】

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てもよいが、これは必須ではない。プログラムは、他のプログラムまたはデータ（たとえばマークアップ言語文書に格納された1つ以上のスクリプト）を保持するファイルの一部に、当該プログラム専用の1つのファイルに、または、複数の連係するファイル（たとえば1つ以上のモジュール、サブプログラム、またはコードの一部を格納するファイル）に、格納することができる。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つのデジタルまたは量子コンピュータ上にデプロイして実行することもできるし、あるいは、1つの場所に位置する複数のデジタルおよび/または量子コンピュータ上、または複数の場所に分散しておりデジタルおよび/または量子データ通信ネットワークで相互に接続された複数のデジタルおよび/または量子コンピュータ上にデプロイして実行することもできる。量子データ通信ネットワークは、量子系（例えば、量子ビット）を用いて量子データを送信し得るネットワークとして理解される。一般的に、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およびデジタルデータの両方を送信し得る。

10

【0098】

本明細書に記載のプロセスおよび論理フローは、1つ以上のプログラマブルなデジタルおよび/または量子コンピュータが、1つ以上のデジタルおよび/または量子プロセッサを用いて動作し、必要に応じて1つ以上のデジタルおよび/または量子コンピュータプログラムを実行し、入力されたデジタルおよび量子データを処理して出力を生成することにより機能を果たすことによって、実行することができる。上記プロセスおよび論理フローは、専用論理回路（例えば、FPGAまたはASIC）または量子シミュレータによって実行することもできるし、専用論理回路または量子シミュレータと1つ以上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との組み合わせによって実行することもできる。また、上記装置をこれらとして実現することもできる。

20

【0099】

1つ以上のデジタルおよび/または量子コンピュータのシステムが特定の操作または動作を実行する「ように構成されている」ということは、当該システム上にソフトウェア、ファームウェア、ハードウェア、またはこれらの組み合わせがインストールされており、動作中、それらが上記システムに上記操作または動作を実行させることを意味する。1つ以上のデジタルおよび/または量子コンピュータプログラムが特定の操作または動作を実行するように構成されているということは、1つ以上のプログラムが命令を含み、その命令がデジタルおよび/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上記操作または動作を実行させることを意味する。量子コンピュータは、量子計算装置によって実行されると上記操作または動作を当該装置に実行させる命令を、デジタルコンピュータから受信してもよい。

30

【0100】

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、汎用または専用のデジタルおよび/または量子プロセッサまたはその両方、または任意の他の種類のデジタルおよび/または量子中央演算装置に基づくものであってもよい。一般的に、デジタルおよび/または量子中央演算装置は、読み取り専用メモリ、ランダムアクセスメモリ、または量子データ（例えば、光子）を送信するのに適した量子系、またはこれらの組み合わせから、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。

40

【0101】

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演算装置と、命令ならびにデジタルおよび/または量子データを格納するための1つ以上のメモリデバイスである。中央演算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てもよいし、それらに組み込まれてもよい。一般的に、

50

デジタルおよび/または量子コンピュータは、デジタルおよび/または量子データを格納するための1つ以上の大容量記憶装置(例えば、磁気ディスク、光磁気ディスク、光ディスク、または量子情報を格納するのに適した量子系)も含むか、または、そのような大容量記憶装置との間でデジタルおよび/または量子データを送受信するように大容量記憶装置に動作可能に接続されているか、またはその両方である。ただし、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とは限らない。

#### 【0102】

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格納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、あらゆる形態の不揮発性のデジタルおよび/または量子メモリ、媒体、およびメモリデバイスを含む。例としては、半導体メモリデバイス(例えば、EPROMデバイス、EEPROMデバイス、およびフラッシュメモリデバイス)、磁気ディスク(例えば、内蔵ハードディスクまたはリムーバブルディスク)、光磁気ディスク、CD-ROMディスクおよびDVD-ROMディスク、ならびに量子系(例えば、トラップ原子またはトラップ電子)等が含まれる。なお、量子メモリは、量子データを高い忠実度および高い効率で長時間記憶することができるデバイスである。例えば、光-物質インターフェイス等がある。光-物質インターフェイスでは、光を用いて送信を行ない、物質を用いて量子データの量子特徴(例えば、重ね合わせまたは量子コヒーレンス等)を記憶および保存する。

10

#### 【0103】

本明細書に記載のさまざまなシステムまたはそれらの一部を制御することは、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で実現することができる。この命令は、1つ以上の非一時的な機械可読記憶媒体に格納されており、1つ以上のデジタルおよび/または量子処理装置上で実行可能である。本明細書に記載のシステムまたはそれらの一部は、1つ以上のデジタルおよび/または量子処理装置と、本明細書に記載の操作を実行するための実行可能命令を格納するメモリとを含み得る装置、方法、またはシステムとして実現することができる。

20

#### 【0104】

本明細書には多くの具体的な実施詳細が含まれるが、これらの詳細は、請求され得る事項の範囲を限定するものではなく、特定の実現例に特有の特徴の説明として考えるべきである。本明細書において別々の実現例の文脈に記載したある特徴を、単一の実現例において組み合わせて実現してもよい。逆に、単一の実現例の文脈に記載したさまざまな特徴を、複数の実現例において別々にまたは任意の適切なサブコンビネーションで実現してもよい。さらに、上記では特徴がある組み合わせで作用するものとして説明し、初めはどのように請求するが、場合によっては請求する組み合わせのうちの一つ以上の特徴を組み合わせから削除することもできるし、請求する組み合わせをサブコンビネーションまたはサブコンビネーションの変形例に向けることもできる。

30

#### 【0105】

同様に、図面では動作を特定の順序で示しているが、望ましい結果を達成するために、これらの動作を図示された特定の順序で、または順番に実行する必要があると理解すべきではなく、または図示された全ての動作を実行する必要があると理解すべきではない。ある状況において、マルチタスキングおよび並列処理が好都合な場合もある。さらに、上述の実現例におけるさまざまなシステムモジュールおよびコンポーネントの分離は、全ての実現例においてそのような分離が必要であると理解すべきではなく、記載したプログラムコンポーネントおよびシステムは、一般的に、単一のソフトウェア製品に一体化され、または複数のソフトウェア製品にパッケージ化することができるかと理解すべきである。

40

#### 【0106】

主題の特定の実現例を説明してきた。下記の特許請求の範囲には他の実現例も含まれる。例えば、特許請求の範囲で列挙する動作を異なる順序で実行してもよく、その場合にも望ましい結果を達成することができる。一例として、望ましい結果を達成するために、添付の図面に示すプロセスは、必ずしも図示された特定の順序または順番に従う必要はない

50

。マルチタスキングおよび並列処理が好都合な場合もある。

【図面】

【図 1】

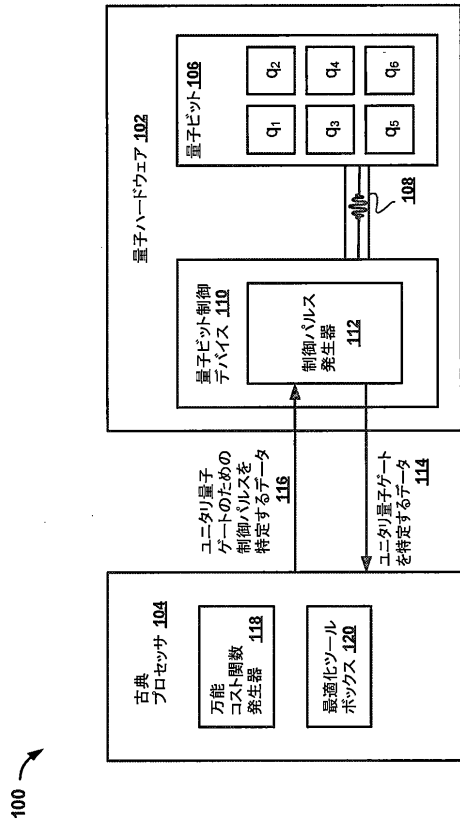


FIG. 1

【図 2】

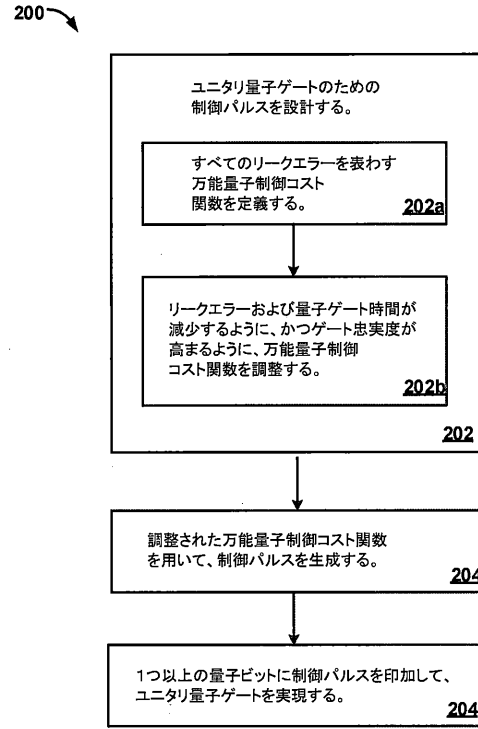


FIG. 2

10

20

30

40

50

【 図 3 】

300 ↗

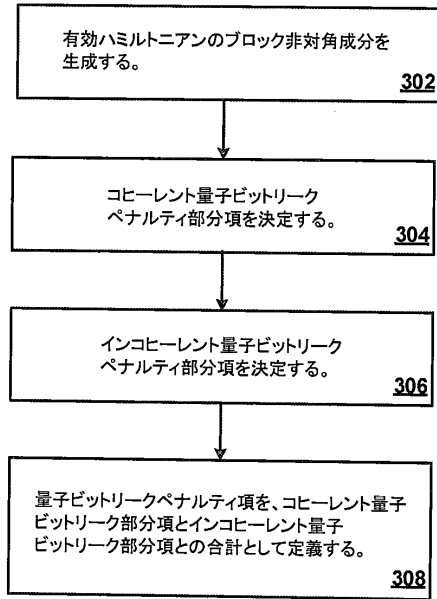


FIG. 3

【 図 4 】

400 ↗

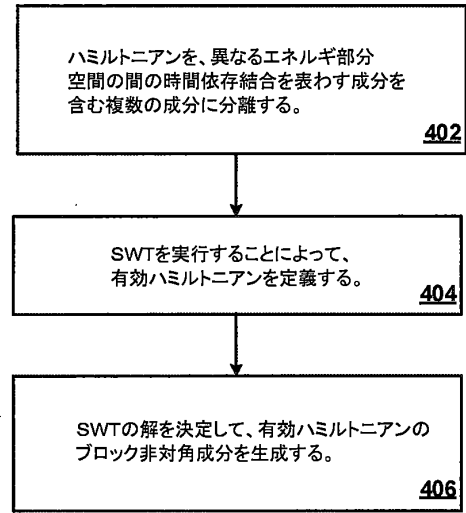


FIG. 4

10

20

30

40

50

## フロントページの続き

- (72)発明者 ネベン, ハルトムート  
アメリカ合衆国、9 4 0 4 3 カリフォルニア州、マウンテン・ビュー、アンフィシアター・パークウェイ、1 6 0 0
- (72)発明者 スメルヤンスキー, バディム  
アメリカ合衆国、9 4 0 4 3 カリフォルニア州、マウンテン・ビュー、アンフィシアター・パークウェイ、1 6 0 0
- (72)発明者 カストリージョ, セルジオ・バイショ  
アメリカ合衆国、9 4 0 4 3 カリフォルニア州、マウンテン・ビュー、アンフィシアター・パークウェイ、1 6 0 0
- 審査官 多賀 実
- (56)参考文献 P. Reberstrost ほか, "Optimal control of a leaking qubit", arXiv.org [online], arXiv:0808.2680v1, 2008年, pp.1-4, [2021年10月26日 検索], インターネット: URL:https://arxiv.org/pdf/0808.2680v1.pdf  
Joydip Ghosh ほか, "Pulse sequences for suppressing leakage in single-qubit gate operations", arXiv.org [online], arXiv:1612.00568v2, 2017年, pp.1-9, [2024年11月26日 検索], インターネット: URL: https://arxiv.org/pdf/1612.00568v2
- (58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)  
G 0 6 N 1 0 / 0 0 - 1 0 / 8 0