

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年12月12日(12.12.2024)



(10) 国際公開番号
WO 2024/252595 A1

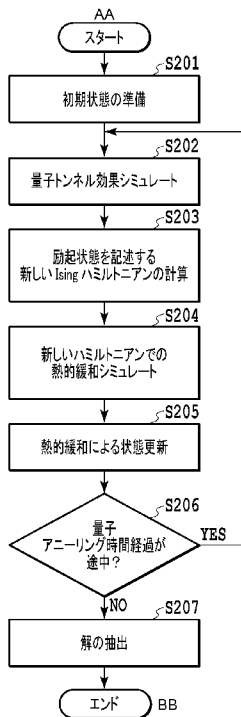
- (51) 国際特許分類:
G06N 99/00 (2019.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/021249
- (22) 国際出願日: 2023年6月7日(07.06.2023)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (**NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION**) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 稲葉 謙介(**INABA Kensuke**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 山田 康博

(**YAMADA Yasuhiro**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 本庄 利守(**HONJO Toshimori**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 武居 弘樹(**TAKESUE Hiroki**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 稲垣 卓弘(**INAGAKI Takahiro**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 生田 拓也(**IKUTA Takuya**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 米津 佑哉(**YONEZU Yuya**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(54) Title: OPTIMIZATION DEVICE AND OPTIMIZATION METHOD

(54) 発明の名称: 最適化装置および最適化方法

[図5]



AA... START
S201... PREPARATION OF INITIAL STATE
S202... QUANTUM TUNNELING EFFECT SIMULATION
S203... CALCULATION OF NEW Ising HAMILTONIAN
DESCRIBING EXCITATION STATE
S204... THERMAL RELAXATION SIMULATION WITH
NEW HAMILTONIAN
S205... UPDATING OF STATE RESULTING FROM THERMAL
RELAXATION
S206... IS QUANTUM ANNEALING TIME STILL IN PROGRESS?
S207... EXTRACTION OF SOLUTION
BB... END

(57) Abstract: This optimization method includes: an initial state preparation step (S201) in which an initial state of a spin state is created on the basis of a random number; a quantum tunneling effect simulation step (S202) in which a time evolution matrix is acted on the initial state to repeatedly find the changing state of the spin state as time passes; a thermal relaxation simulation step (S204) in which generated is an expected energy value that includes the state simulated in the quantum tunneling effect simulation step and the excitation state of the simulated state; and a state update step (S205) in

(74) 代理人: 弁理士法人谷・阿部特許事務所
(TANI & ABE, P.C.); 〒1070052 東京都港区赤坂2丁目6番20号 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

which, if it is determined, on the basis of the expected energy value acquired in a thermal relaxation introduction step, that a non-adiabatic transition has occurred in the course of quantum annealing, the spin state is updated. The quantum tunneling effect simulation step, the thermal relaxation simulation step, and the state update step realize a series of processing steps. The optimization method also includes a solution extraction step (S207) in which, from the results of repeating the series of processing steps for a prescribed period of time, an optimal solution is determined.

(57) 要約: 乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態の準備工程 (S 2 0 1) と、初期状態に時間発展行列を作用させ、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子トンネル効果シミュレート工程 (S 2 0 2) と、量子トンネル効果シミュレート工程において模擬された状態と、この状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を生成する熱的緩和シミュレート工程 (S 2 0 4) と、熱的緩和導入工程において取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新する状態更新工程 (S 2 0 5) と、を含み、量子トンネル効果シミュレート工程、熱的緩和シミュレート工程、状態更新工程は一連の処理を実現し、一連の処理を所定の時間繰り返した結果から、最適解を求める会の抽出工程 (S 2 0 7) とにより最適化方法を構成する。

明 細 書

発明の名称：最適化装置および最適化方法

技術分野

[0001] 本開示は、最適化装置および最適化方法に関し、詳しくは、アニーリングアルゴリズムを用いた最適化技術に関する。

背景技術

[0002] アニーリングアルゴリズムの一つとして、シミュレーテッドアニーリングが知られている。シミュレーテッドアニーリングは、磁性体等で生じる熱的緩和現象をモデルにして、組合せ状態を探索する手法である（非特許文献1）。また、別のアルゴリズムとして、量子アニーリングが知られており（非特許文献2）、この手法は、量子力学的なトンネル効果等を使って組み合わせの最適化を行う手法である。

先行技術文献

非特許文献

[0003] 非特許文献1：Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr, C. D.; Vecchi, M. P. (1983).
“Optimization by Simulated Annealing”. Science 220 (4598): 671-680

非特許文献2：T. Kadowaki and H. Nishimori, “Quantum annealing in the transverse Ising model” Phys. Rev. E 58, 5355 (1998)

非特許文献3：Elizabeth Crosson, Aram W. Harrow, “Simulated Quantum Annealing Can Be Exponentially Faster than Classical Simulated Annealing”. Proc of FOCS 2016, pp. 714-723, Arxiv: 1601.03030 New York: Plenum. pp. 85-103.

非特許文献4：M. H. S. Amin, Peter J. Love, C. J. S. Truncik, “Thermally assisted adiabatic quantum computation”. Phys. Rev. Lett. 100, 060503 (2008), cond-mat 0609332

非特許文献5：Richard M. Karp (1972). “Reducibility Among Combinatoria

l Problems". In R. E. Miller; J. W. Thatcher; J.D. Bohlinger (eds.). Complexity of Computer Computations.

非特許文献6: Aditi Misra-Speldenner, Dmitry Bagrets, Frank Wilhelm-Mauch, Peter Schuhmacher, Tim Bode, Tobias Stollenwerk "Semiclassical (mean field) Approximate Optimization Algorithm" Adiabatic quantum computing 2022, [2023年5月27日検索]、インターネットhttp://video.ictp.it/WEB/2022/2022_06_20-smr3718/2022_06_20-11_50-smr3718.mp4

発明の概要

- [0004] ところで、シミュレーテッドアニーリングは汎用性の高いアルゴリズムであるが、近年では量子アニーリングがシミュレーテッドアニーリングを超える性能を示す場合がある（非特許文献3）。また、量子アニーリングに、シミュレーテッドアニーリングに係る熱的緩和が取り入れられる場合、さらに性能の向上がみられることが、報告されている（非特許文献4）。しかし、量子アニーリングは、量子効果を実現することのできる専用の物理マシンでその性能が十分に発揮される。
- [0005] 本開示は、上記の点に鑑みてなされたものであり、量子アニーリングを近似的に表したトンネル効果を取り込んだ、熱的緩和をシミュレートするシミュレーテッドアニーリングを構築し、一般的なコンピュータで実施可能な最適化装置および最適化方法を提供することを目的とする。
- [0006] 上記目的を達成するために本開示の一態様の最適化装置は、熱的緩和によって最適解を求める最適化装置であって、エネルギー関数について、量子トンネル効果をシミュレートする量子効果シミュレート部と、シミュレートした前記トンネル効果を取り入れたエネルギー関数について、熱的緩和をシミュレートする熱緩和シミュレート部と、前記量子効果シミュレート部による量子トンネル効果のシミュレートと、前記熱緩和シミュレート部による熱的緩和のシミュレートを、交互に実行させる制御部と、を含む。
- [0007] また、本開示の一態様の最適化装置は、乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態作成部と、前記初期状態に時間発展行列を作用させ

、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子アニーリング模擬部と、前記量子アニーリング模擬部によって模擬された状態と、当該状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を生成する熱的緩和導入部と、前記熱的緩和導入部によって取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じているか否か判断する非断熱的遷移判断部と、前記非断熱的遷移判断部により前記非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新するスピン状態更新部と、を含み、前記量子アニーリング模擬部、前記熱的緩和導入部、前記非断熱的遷移判断部及び前記スピン状態更新部は、連続して動作して一連の処理を実現し、前記一連の処理を所定の時間繰り返した結果から、最適解を求める最適解取得部と、を含む。

[0008] 本開示の一態様の最適化方法は、乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態作成工程と、前記初期状態に時間発展行列を作用させ、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子アニーリング模擬工程と、前記量子アニーリング模擬工程において模擬された状態と、当該状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を生成する熱的緩和導入工程と、前記熱的緩和導入工程において取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じているか否か判断する非断熱的遷移判断工程と、前記非断熱的遷移判断工程により前記非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新するスピン状態更新工程と、を含み、前記量子アニーリング模擬工程、前記熱的緩和導入工程、前記非断熱的遷移判断工程及び前記スピン状態更新工程は、連続して一連の処理を実現し、前記一連の処理を所定の時間繰り返した結果から、最適解を求める最適解取得工程と、を含む。

図面の簡単な説明

[0009] [図1] 2 値スピンの状態とエネルギーとの関係の例を示す図である。

[図2] 熱的緩和を説明するための図である。

[図3] トンネル効果を説明するための図である。

[図4]本開示の一実施形態の最適化装置を説明するための機能ブロック図である。

[図5]図4に示すコンピュータで実行される最適化方法を示すフローチャートである。

[図6]本開示の一実施形態のトンネル効果と熱的緩和の両方を考慮して最適解を探す処理を説明するための図である。

[0010] 以上の形態によれば、量子アニーリングを近似化してノイマン型等の一般的なコンピュータで扱えるようにし、トンネル効果に熱的緩和現象を取り入れて最適化の性能を高めた最適化装置、最適化方法を提供することができる。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、本開示の一実施形態について説明する。まず、具体的な実施形態に先んじて、基本的な最適化問題の解法について説明する。

[0012] [最適化問題]

ほとんどすべての組み合わせ最適化問題は、多項式時間でイジング問題にマッピングできることが知られている（非特許文献5）。ここで、イジング問題とは、以下の式（1）のイジングハミルトニアンを最小化することである。

$$H_{Ising} = \frac{1}{2} \sum_{ij} J_{ij} \sigma_{zi} \sigma_{zj} + \sum_i B_i \sigma_{zi} \cdots \text{式（1）}$$

[0013] 上記の式（1）において、 $i, j = 1, 2, \dots, N$ 、 J_{ij} はイジング相互作用項、 B_i は磁場項である。イジングスピン σ_{zi} は $\sigma_{zi} = \{-1, 1\}$ の2値スピンである。2値スピンの全ての組み合わせを考察すると、 2^N の状態が含まれる。そのため、全状態にわたってエネルギーを考察することは、 N の増加とともに現実的でなくなる。シミュレーテッドアニーリングは、このイジングハミルトニアンの熱的励起及び緩和を考察することで有効的に幅広い空間で解探索が実行される。ここで、スピン σ_{zi} が逆向きのスピン $-\sigma_{zi}$ に変更される状態遷移を考えると、遷移前後のエネルギー差は、以下の式（2）ののように表される。

$$\Delta E = 2\sigma_{zi}(\sum_j J_{ij}\sigma_{zj} + B_i) \quad \cdots \text{式 (2)}$$

[0014] このとき、 $\Delta E < 0$ となってエネルギー緩和が起こる場合は、常に状態遷移を受け入れる。一方、励起を表す $\Delta E > 0$ の状態遷移は、パラメータとして定義する温度 T 、一様乱数 $r = [0, 1]$ を用いて $\exp(-\Delta E/T) < r$ の場合に限り受け入れる。温度 T は、シミュレーションが進むにつれて徐々に下げていく。このように、状態遷移に熱的励起／緩和を模擬し、基本的にはエネルギーが下がる状態をとりつつエネルギーの上昇を伴う熱的励起が一定の確率で生じることを許容することで、エネルギーの局所的な最適解から脱出し、最適解へと向かうことができる。

[0015] 図 1 および図 2 は、は、上述の熱的緩和により最適解へと向かうことを説明するための図であり、それぞれ 2 値スピンの状態とエネルギーとの関係、すなわち、エネルギー関数の例を示す図である。図 1 の横軸はスピンの状態を示し、縦軸はエネルギーを示している。図 1 に示す曲線のうち、エネルギーが最も低くなる点に対応する状態が基底状態（最適解）である。図 2 は、熱的緩和を説明するための図であって、横軸は図 1 の状態と同様の状態を示しているが、図示を略している。図 2 の縦軸はエネルギーを示す。

[0016] 図 2 に示すように、シミュレーテッドアニーリングによれば、熱励起で許される範囲の障壁を乗り越える。図 2 に示す例では、熱的励起／緩和によってポテンシャル障壁を上ったり下ったりを繰り返して状態 s_1 から状態 s_2 へ状態が遷移し、目的とする最適解を探す。ポテンシャル障壁が温度の逆数のスケールを超えるほど深い場合、上述の許容される（受け入れられる）熱励起による状態遷移では、そのポテンシャル障壁を越えることができないため、最適解ではなく局所的最適解にトラップされる（ s_2 ）。

[0017] 一方、量子アニーリングは、以下の式 (3) のようなイジングハミルトニアンによって記述される量子力学的時間発展により、イジングハミルトニアンの最低エネルギー状態を探す。

$$H = H_{\text{Ising}} + h_x \sum_i \sigma_{xi} \quad \cdots \text{式 (3)}$$

式 (3) の右辺は、横磁場項と呼ばれる項である。

[0018] 式(3)中の $\sigma_{\alpha i}$ は i 番目($i=1 \cdots N$)の α ($=x, y, z$)成分のパウリ行列である。パウリ行列は 2×2 の行列で、 x, y, z 成分はそれぞれ以下のとおりである。

$$\begin{aligned} x &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ y &= \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \\ z &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

量子アニーリングでは、 $\hbar x \gg 1$ と設定し、初期状態は以下の式(4)、(5)によって表される。

$$|\psi\rangle = \prod_i |+\rangle_i \quad \cdots \text{式(4)}$$

$$|+\rangle_i = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_i + |\downarrow\rangle_i) \quad \cdots \text{式(5)}$$

[0019] 量子アニーリングでは、上記の初期状態から出発し、徐々に $\hbar x = 0$ の極限に変化させ、状態 $|\psi\rangle$ の時間変化 $|\psi(t)\rangle = \exp(-i t H) |\psi\rangle$ を解析する。量子アニーリングにおいては、横磁場項を構成する σ_{xi} とイジングハミルトニアンを構成する σ_{zi} は交換しない $\sigma_{xi} \sigma_{zi} \neq \sigma_{zi} \sigma_{xi}$ のために量子的な揺らぎが生じる。また、 x 成分のパウリ行列 σ_{xi} は、スピンを反転させるような効果をもち、これがエネルギー障壁を飛び越えるような量子トンネル遷移を引き起こす。ダイナミクスが断熱的で、非断熱遷移が生じなければ最終状態 $|\psi(t_L)\rangle$ は、Isingハミルトニアンの最低エネルギー状態であることが保証される。しかしながら、現実的には有限の時間 t_L で実行するため、非断熱遷移が生じ最低エネルギー状態以外の解を得ることもある。そのため、量子アニーリングの過程の途中に、シミュレーテッドアニーリングに係る熱的緩和を含む場合に、効率よく解探索が行われる(非特許文献4)。

[0020] 図3は、トンネル効果を説明するための図であって、図2と同様に、図3の横軸は状態を示し、縦軸はエネルギーを示す。量子力学的トンネル効果は、ポテンシャル障壁を貫いて状態 s_3 から s_4 へ状態の遷移が起こり、最適解を探す。

[0021] ところで、式(3)の量子アニーリングハミルトニアンに対して平均場近似を行うと、以下の式(6)のように書き換えられる。

$$H = \sum_{ij} (J_{ij} \langle \sigma_{zi} \rangle + B_i) \sigma_{zj} + \hbar x \sum_i \sigma_{xi} \quad \cdots \text{式(6)}$$

式(6)において、 $\langle \rangle$ の記号は期待値を意味するが、計算手法については後述する。式(6)の右辺の第一項の一部を、 $h_{zi} = \sum_j J_{ij} \langle \sigma_{zi} \rangle + B_i$ と書きなおし、一般化のためさらに h_{yi} 項を加えると、下記のように変更できる。

$$H = \sum_i H_i = \sum_i \vec{h}_i \cdot \vec{\sigma}_i = \sum_i \sum_{\alpha} h_{\alpha i} \sigma_{\alpha i} \quad \cdots \text{式(7)}$$

[0022] このハミルトニアンを用いた各スピン演算子の期待値の微小な時間発展は、以下の式（８）のように記述できる。

$$\sigma_{ai}(t+\delta t) = \langle \phi(t) | e^{i\delta t H_i} \sigma_{ai} e^{-i\delta t H_i} | \phi(t) \rangle \quad \dots \text{式（８）}$$

式（８）において、 t は時間、 δt は微小な時間、 $|\phi(t)\rangle$ は時間 t における状態である。ここで、指数関数で記述される時間発展演算子は、次の式（９）で表される。

$$e^{-i\delta t H_i} = \cos(\delta t \Delta_i) - \sin(\delta t \Delta_i) \vec{f}_i^t \cdot \vec{\sigma}_i \quad \dots \text{式（９）}$$

ここで、 $\Delta_i = \sqrt{\vec{h}_i^t \cdot \vec{h}_i}$ 、 $\vec{f}_i = \vec{h}_i / \Delta_i$ である。また、パウリ行列のベクトル表記 $\vec{\sigma}_i(t) = (\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi})$ を用いれば、次のような関係式で $\vec{\sigma}_i(t)$ の時間発展を記述できる。

$$\vec{\sigma}_i(t+\Delta t) = (C_i \mp (1-C_i)|f_i\rangle\langle f_i| - S_i R_i) \vec{\sigma}_i(t) \quad \dots \text{式（１０）}$$

[0023] 上記の式（１０）において、

$$C_i = \cos(2\delta t \Delta_i), S_i = \sin(2\delta t \Delta_i) \quad \dots \text{式（１１）}$$

$$|f_i\rangle\langle f_i| = \begin{pmatrix} f_{xi}f_{xi} & f_{xi}f_{yi} & f_{xi}f_{zi} \\ f_{yi}f_{xi} & f_{yi}f_{yi} & f_{yi}f_{zi} \\ f_{zi}f_{xi} & f_{zi}f_{yi} & f_{zi}f_{zi} \end{pmatrix} \quad \dots \text{式（１２）}$$

$$R_i = \begin{pmatrix} 0 & -f_{zi} & f_{yi} \\ f_{zi} & 0 & -f_{xi} \\ -f_{yi} & f_{xi} & 0 \end{pmatrix} \quad \dots \text{式（１３）}$$

である。ここで、この時間発展をひとまとめに記述する 3×3 の行列 M_i を以下のように定義する。

$$M_i = C_i \mp (1-C_i)|f_i\rangle\langle f_i| - S_i R_i \quad \dots \text{式（１４）}$$

$$\sigma_{ai}(t+\delta t) = \sum_{\beta} M_{a\beta i} \sigma_{\beta i}(t) \quad \dots \text{式（１５）}$$

[0024] 以上のようにすれば量子力学的なトンネル効果を取り込んだ時間発展が近似的に記述できることが、例えば、非特許文献６に記載されている。

[0025] [実施形態]

以下、本開示の一実施形態を具体的に説明する。本実施形態は、図２に示したシミュレーテッドアニーリングに、図３に示した量子アニーリングのトンネル効果を適用することにより、最適解を求める性能を高めた最適化装置及び最適化方法を実現する。なお、本開示は、トンネル効果については平均場近似で近似されたダイナミクスを用いる。

[0026] 図４は、本実施形態の最適化装置を説明するための機能ブロック図である。本実施形態では、コンピュータ１００が最適化装置として機能する。コンピュータ１００は、ノイマン型のコンピュータであって、ＣＰＵ（Central Processor Unit）１０１、メモリ１０２、Ｉ／Ｏ（Input/Output）部１０３を含んでいる。Ｉ／Ｏ部１０３は、最適化問題を表すイジングハミルトニアン

の情報、すなわち J_{ij} 及び B_i を入力する構成である。なお、 J_{ij} 及び b_i については後述する。

[0027] メモリ 102 は、入力された J_{ij} 及び B_i をロードする構成である。また、メモリ 102 には、数式で与えられるアルゴリズムを CPU 101 において演算するためのプログラムがロードされている。このプログラムは、初期状態を乱数によって準備し、図 2 のチャートに従って演算を繰り返して解となるスピンセットを得る。得られたスピンセットは、再び I/O 部 103 より出力される。CPU 101 は、FPGA や GPU 等の CPU 以外の演算ユニットに置き換えても良い。なお、コンピュータ 100 で演算されるアルゴリズムについては、後に詳述する。

[0028] 本実施形態のコンピュータ 100 は、熱的緩和によって最適解を求める最適化装置である。そして、特に、CPU 101 は、エネルギー関数について、量子トンネル効果をシミュレートする量子効果シミュレート部、シミュレートした前記トンネル効果を取り入れたエネルギー関数について、熱的緩和をシミュレートする熱緩和シミュレート部、量子効果シミュレート部による量子トンネル効果のシミュレートと、熱緩和シミュレート部による熱的緩和のシミュレートを、交互に実行させる制御部として機能する。

[0029] より詳細には、CPU 101 は、乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態作成部、初期状態に時間発展行列を作用させ、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子アニーリング模擬部、量子アニーリング模擬部によって模擬された状態と、この状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を取得する熱的緩和導入部と、熱的緩和導入部によって取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じているか否かを判断する非断熱的遷移判断部と、非断熱的遷移判断部により非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新するスピン状態更新部と、量子アニーリング模擬部、熱的緩和導入部、非断熱的遷移判断部及びスピン状態更新部が連続して動作することにより一連の処理を実現し、この一連の処理を所定の時間繰り返した結

果から、最適解を求める最適解取得部として機能する。

[0030] 図5は、コンピュータ100で実行される最適化方法を示すフローチャートである。図示したフローチャートは、先ず、量子アニーリングの近似された量子ダイナミックスについて、初期状態を模擬した初期状態を準備する（ステップS201）。そして、初期状態から出発し、時間発展を一定の回数繰り返し、量子アニーリングのトンネル効果をシミュレートする（ステップS202）。次に、上記トンネル効果を取り入れた、シミュレーテッドアニーリングの励起状態を取り入れたIsingハミルトニアンを作成する（ステップS203）。そして、作成されたIsingハミルトニアンに対し、シミュレーテッドアニーリングを用いることによって熱的緩和シミュレートを実行する（ステップS204）。そして、シミュレートの結果、非断熱的な遷移が生じているか否かに応じて、熱的緩和によるスピン状態を更新する（ステップS205）。次に、本実施形態の最適化方法は、処理時間が量子アニーリング経過時間に達したか否かを判断する（ステップS206）。

[0031] コンピュータ100は、以上の処理を、メモリ102にロードされ、CPU101によって実行されるプログラムによって実行する。プログラムの実行は、図5に示すフローチャートで示すソフトウェアと、コンピュータ100が備える公知のハードウェアが協働して実現する。

[0032] ステップS206の判断の結果、処理時間が量子アニーリング経過時間に達していない場合にはステップS202以降の処理を再び実行する。このように、CPU101は、量子トンネル効果シミュレート、新しいIsingハミルトニアンの計算、熱的緩和シミュレート、熱的緩和による状態更新の一連の処理を実行する。そして、CPU101は、このような一連の処理を、量子アニーリング経過時間に達するまで繰り返し実行する。さらに、CPUは、繰り返し行われた結果から最適解を抽出する（ステップS207）。以下、上述した各ステップの処理を詳細に説明する。

[0033] S201：初期状態の準備

図5に示す、初期状態の準備について説明する。この処理は、量子アニー

リングの近似された量子ダイナミクスについてシミュレーションすることによって相当する。図4に示すコンピュータ100は、先ず、以下のように、式(17)によって表される初期状態を作成する。

$$[0034] \quad \vec{s}_x = 1, \vec{s}_y = 0, \vec{s}_z = \delta \vec{N}_{random} \quad \dots \text{式 (16)}$$

$$\vec{\sigma}_\alpha = \vec{s}_\alpha / \sqrt{\sum_\beta \vec{s}_\beta^2} \quad \dots \text{式 (17)}$$

ここで、 s はスピンの状態を示し、 δ は微小なパラメータであり、 $\vec{N}_{random}$ は、適当な乱数による数値生成を意味する。乱数は、 $|\delta \vec{N}_{random}| < 1$ であればどのような乱数を用いても構わない。このような初期状態は、量子アニーリングで準備される初期状態、すなわち、式(4)に極めて近い状態、 $|\Psi\rangle \sim \prod_i |+\rangle_i$ である。微小な乱数によって量子アニーリングの初期状態 $\prod_i |+\rangle_i$ から軽微な変更が加えられるが、これは有限の σ_{zi} から出発して平均場近似を成立させるためである。

[0035] S202：量子トンネル効果シミュレーション

量子トンネル効果シミュレーションでは、上記のように設定した初期のスピン状態 $\sigma_{\alpha i}$ から出発し、式(14)で与えられる時間発展行列 M_i を各成分に $\sigma_{\alpha i}$ に作用させる。この演算は、初期状態のスピン状態をある特定の規則に基づいて変化させることを意味している。なお、スピン状態の変化は、近隣のスピンとの相互作用や外部磁場の影響に依存する。時間発展行列 M_i を $\sigma_{\alpha i}$ に作用させる演算は、以下の式(18)によって表される。

$$\sigma_{\alpha i}^{new} = \sum_\beta M_{\alpha\beta i} \sigma_{\beta i} \quad \dots \text{式 (18)}$$

[0036] 時間発展行列 M_i を用いる時間発展を一定の回数、 h_x が0になるまで繰り返すことで量子アニーリングのトンネル効果を有効的に模擬できる。 h_x の減少率や繰り返し回数はパラメータとして適当に設定する。ここで、トンネル効果を含む量子ダイナミクスで新たに得られた式(19)の左辺によって記述される状態 $|\Psi^{new}\rangle$ は以下のように記述できる。式(19)の $|b\rangle_i$ は、以下で与えられる擬スピン状態である。

$$[0037] \quad |\Psi^{new}\rangle = \prod_i |b\rangle_i \quad \dots \text{式 (19)}$$

$$|b\rangle_i = v_{\uparrow i} |\uparrow\rangle_i + v_{\downarrow i} |\downarrow\rangle_i \quad \dots \text{式 (20)}$$

$$v_{\uparrow i} = \frac{\sigma_{xi}^{new} - i\sigma_{yi}^{new}}{\sqrt{2(1 - \sigma_{zi}^{new})}}, v_{\downarrow i} = \sqrt{\frac{1 - \sigma_{zi}^{new}}{2}} \quad \dots \text{式 (21)}$$

[0038] 本実施形態は、平均場近似によって記述されたトンネル効果を考慮しているため、非断熱な励起が生じる可能性が高いことを考慮する必要がある。そ

ここで、上記の状態 $|\Psi^{\text{new}}\rangle$ に対する励起状態を考察する。励起状態は、 $2^N - 1$ のヒルベルト空間を用いて次のように与えられる。各サイトのブロッホベクトルで指定される方向に容易化軸をとり、

$s_j = \{-1, 1\}$ $i = 1, 2, \dots, N$ で状態を表すと、状態 $|\Psi^{\text{new}}\rangle$ は全ての i について $s_j = 1$ の場合に対応する。それ以外の場合の任意の励起状態は、以下の式 (22) で与えられる。

$$|\Psi_{\text{ex}}^{\text{new}}\rangle = \prod_i |sb\rangle_i \quad \dots \text{式 (22)}$$

[0039] $s_j = \{-1, 1\}$ の組み合わせによって、最低一つの $s_j = -1$ を含む基底以外の残りの $2^N - 1$ 個の状態がすべて記述できる。ここで、励起状態に最低一つは含まれる逆向きのスピン状態 $|-b\rangle_i$ は以下のように与えられる。ここで、2つのスピン $|\pm b\rangle_i$ は正規直交したベクトルである。つまり、 $\langle b | b \rangle = \langle -b | -b \rangle = 1$, $\langle b | -b \rangle = \langle -b | b \rangle = 0$ が成立する (簡単のため、 i は省略した)。

$$[-b]_i = u_{1i} |\uparrow\rangle_i + u_{1i} |\downarrow\rangle_i \quad \dots \text{式 (23)}$$

$$u_{1i} = \frac{-\sigma_{zi}^{\text{new}} + i\sigma_{yi}^{\text{new}}}{\sqrt{2(1+\sigma_{zi}^{\text{new}})}} \quad \dots \text{式 (24)}$$

$$u_{1i} = \sqrt{\frac{1+\sigma_{zi}^{\text{new}}}{2}} \quad \dots \text{式 (25)}$$

状態 $|\Psi^{\text{new}}\rangle$ を含むすべての状態 $|\Psi_{\text{ex}}^{\text{new}}\rangle$ のエネルギー期待値は、以下の式で与えられる。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{ij} J_{ij} \sigma_{zi}^{\text{new}} \sigma_{zj}^{\text{new}} s_i s_j + \sum_i (B_i \sigma_{zi}^{\text{new}} + h_x \sigma_{xi}^{\text{new}}) s_i \quad \dots \text{式 (26)}$$

[0041] S203: (新しいイジング (Ising) ハミルトニアン) の計算)

以上より、トンネル効果を取り入れて時間発展させた状態 $|\Psi^{\text{new}}\rangle$ と、その励起状態 $|\Psi_{\text{ex}}^{\text{new}}\rangle$ を含むすべてのエネルギー期待値は、次のイジングハミルトニアンで与えられることが分かる。

$$H_{\text{Ising}}^{\text{new}} = \frac{1}{2} \sum_{ij} K_{ij} s_i s_j + \sum_i C_i s_i \quad \dots \text{式 (27)}$$

$$K_{ij} = J_{ij} \sigma_{zi}^{\text{new}} \sigma_{zj}^{\text{new}} \quad \dots \text{式 (28)}$$

$$C_i = (B_i \sigma_{zi}^{\text{new}} + h_x \sigma_{xi}^{\text{new}}) \quad \dots \text{式 (29)}$$

式 (27) の $H_{\text{Ising}}^{\text{new}}$ を、以下、「新しく得られたイジングハミルトニアン」とも記す。

[0042] S204: 熱的緩和シミュレート

以上説明した処理により量子トンネル効果を記述した後、その新しく得られたイジングハミルトニアンに対し、シミュレーテッドアニーリングを適用

する。これにより、量子アニーリングのトンネル効果を有する熱的緩和のプロセスをシミュレートすることができる。

[0043] S 2 0 5 : 熱的緩和による状態更新

量子トンネル効果による非断熱遷移が全く生じなかった場合、新しく得られたイジングハミルトニアン基底状態は、すべての i について $s_i = 1$ の状態（完全フェロ状態）となり、トンネル効果で記述される状態からの変化が不要であることが分かる。一方、この熱的緩和プロセスで、 $s_i = -1$ を含む状態の方が、すべて $s_i = 1$ の状態よりもエネルギー期待値が低い状態として得られる場合がある。このような場合は、量子アニーリングの過程でトンネル効果による非断熱的な遷移が生じていることに対応しており、次の量子アニーリングステップ（S 2 0 2）に移る前に、スピンの状態を以下の式（3 0）で更新する。

[0044] $\sigma_{ii}^{new} = s_i \sigma_{ii}^{new} \quad \dots \text{式 (3 0)}$

以上のプロセスを、量子アニーリング時間を進行させながら繰り返すことで、トンネル効果と熱的緩和との両方をとらえたハイブリッドシミュレーテッドアニーリングが可能となる。

[0045] S 2 0 7 : 解の抽出

解の抽出は、量子アニーリングを模した観測による状態生成を行うことによって行われる。この処理は、量子トンネル効果シミュレート（ステップ S 2 0 2）の量子アニーリングステップと、新しい $Ising$ の計算（ステップ S 2 0 3）、熱的緩和シミュレート（ステップ S 2 0 4）、熱的緩和による状態更新（ステップ S 1 0 1）を含む熱的緩和ステップを繰り返して得られた最終的なスピン状態（式 3 1 の左辺）と、一様乱数 $r = [0, 1]$ を用いて求められる。

[0046]

$$\frac{1+\sigma_{zi}^{last}}{2} < r \quad \dots \text{式 (3 1)}$$

最終的なスピン状態と一様乱数との関係が式 (3 1) のようになる場合、解スピン $\sigma_{zi}^{ans} = -1$ とし、それ以外の場合 $\sigma_{zi}^{ans} = 1$ とする。このようにすると、 2^N の解空間の中から一定の割合で状態が観測される状態を模擬することができる。また、この状態生成を用いずに、もっとも生成確率が高い状態、 $\sigma_{zi}^{ans} = \text{sign}(\sigma_{zi}^{last})$ を解として出力しても良い。上述の測定は、 $|\sigma_{zi}^{last}|$ が 1 から離れている場合、生成確率が高い $\sigma_{zi}^{ans} = \text{sign}(\sigma_{zi}^{last})$ の状態から一定の確率でスピンがフリップした状態が測定されることを意味している。

[0047] 図 6 は、本実施形態の量子アニーリングのトンネル効果を取り入れたシミュレーテッドアニーリングの熱的緩和における最適解の探索を概念的に説明する図である。図 6 の横軸はスピンの状態であり、縦軸はエネルギーを示す。本実施形態は、図 5 に示したステップ S202～S205 を繰り返し実行することにより、シミュレーテッドアニーリングの熱的緩和 (S204) と量子トンネル効果の適用 (S202) が交互に行われる。すなわち、図 6 は一連の繰り返し処理の一部を示しており、step k で熱的緩和が行われた後、step (k+1) でトンネル効果の適用が行われることを示している。

[0048] 熱的緩和では、図の曲線で示すエネルギー分布に対して、(スピン) 状態の探索が行われる。この探索において、シミュレーテッドアニーリングの熱的緩和で許容される熱励起 Δa がポテンシャル障壁のエネルギー値 (高さ) Δk より小さい場合、図に示すように「局所解」で示すエネルギーに状態探索が捕らわれる (図の黒丸)。これに対し、本実施形態は、次の step (k+1) でトンネル効果の適用が行われる。これにより、エネルギーの状態探索は、トンネル効果によってポテンシャル障壁を透過し、他の状態に移ることができる。この処理を繰り返すことにより、状態探索は最適解にたどり着くことができる。

[0049] 以上説明した本実施形態によれば、量子アニーリングを近似的に表したトンネル効果を取り込んだ、熱的緩和をシミュレートするシミュレーテッドアニーリングを構築し、一般的なコンピュータで実施可能な最適化装置を提供することが可能となる。

符号の説明

[0050] コンピュータ 100

CPU 101

メモリ 102

I/O部 103

請求の範囲

[請求項1]

熱的緩和によって最適解を求める最適化装置であって、
エネルギー関数について、量子トンネル効果をシミュレートする量子効果シミュレート部と、
シミュレートした前記トンネル効果を取り入れたエネルギー関数について、熱的緩和をシミュレートする熱緩和シミュレート部と、
前記量子効果シミュレート部による量子トンネル効果のシミュレートと、前記熱緩和シミュレート部による熱的緩和のシミュレートを、交互に実行させる制御部と、
を含む、最適化装置。

[請求項2]

乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態作成部と、
、
前記初期状態に時間発展行列を作用させ、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子アニーリング模擬部と、
前記量子アニーリング模擬部によって模擬された状態と、当該状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を生成する熱的緩和導入部と、
、
前記熱的緩和導入部によって取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じているか否かを判断する非断熱的遷移判断部と、
前記非断熱的遷移判断部により前記非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新するスピン状態更新部と、を含み、
前記量子アニーリング模擬部、前記熱的緩和導入部、前記非断熱的遷移判断部及び前記スピン状態更新部は、連続して動作して一連の処理を実現し、前記一連の処理を所定の時間繰り返した結果から、最適解を求める最適解取得部と、
を含む、最適化装置。

[請求項3] 前記初期状態作成部は、

$$\vec{s}_x = 1, \vec{s}_y = 0, \vec{s}_z = \delta \vec{N}_{random}$$

$$\vec{\sigma}_\alpha = \vec{s}_\alpha / \sqrt{\sum_\beta \vec{s}_\beta^2}$$

の式によって初期状態を作成する、請求項2に記載の最適化装置。

[請求項4] 前記量子アニーリング模擬部は、前記初期状態作成部から出発し、時間発展行列を前記初期状態の各成分に作用させて模擬的に量子アニーリングを実行する、請求項2に記載の最適化装置。

[請求項5] 前記時間発展行列は、

$$\sigma_{\alpha i}^{new} = \sum_\beta M_{\alpha \beta i} \sigma_{\beta i}$$

である、請求項4に記載の最適化装置。

[請求項6] 前記熱的緩和導入部は、

$$H_{Ising}^{new} = \frac{1}{2} \sum_{ij} K_{ij} s_i s_j + \sum_i C_i s_i$$

$$K_{ij} = J_{ij} \sigma_{zi}^{new} \sigma_{zj}^{new}, C_i = (B_i \sigma_{zi}^{new} + h_x \sigma_{xi}^{new})$$

の式を使って前記エネルギー期待値を生成する、請求項2に記載の最適化装置。

[請求項7] 前記非断熱的遷移判断部は、 $s_i = -1$ を含む状態の方が、全ての $s_i = 1$ の状態よりもエネルギー期待値が低い状態として得られる場合、非断熱的遷移が生じていると判断する、請求項6に記載の最適化装置。

[請求項8] 前記スピン状態更新部は、

$$\sigma_{\alpha i}^{new} = s_i \sigma_{\alpha i}^{new}$$

の式を使ってスピン状態を更新する、請求項2に記載の最適化装置。

[請求項9] 乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態作成工程と、

前記初期状態に時間発展行列を作用させ、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子アニーリング模擬工程と、

前記量子アニーリング模擬工程において模擬された状態と、当該状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を生成する熱的緩和導入工程と、

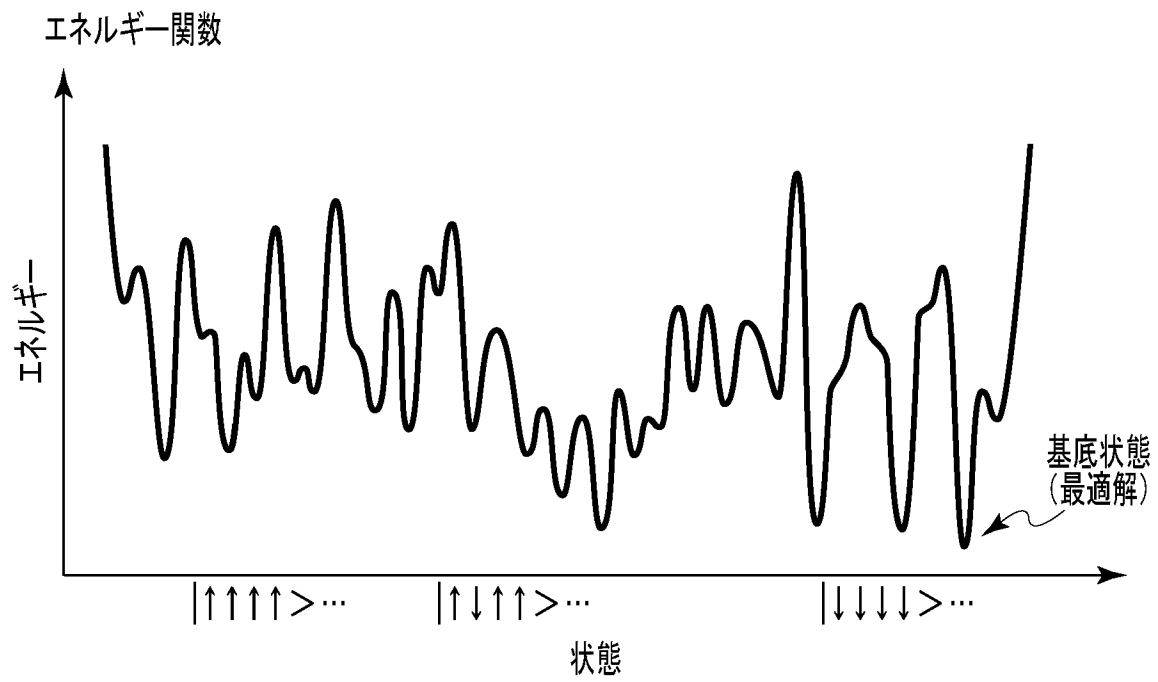
前記熱的緩和導入工程において取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じているか否か判断する非断熱的遷移判断工程と、

前記非断熱的遷移判断工程により前記非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新するスピン状態更新工程と、を含み、

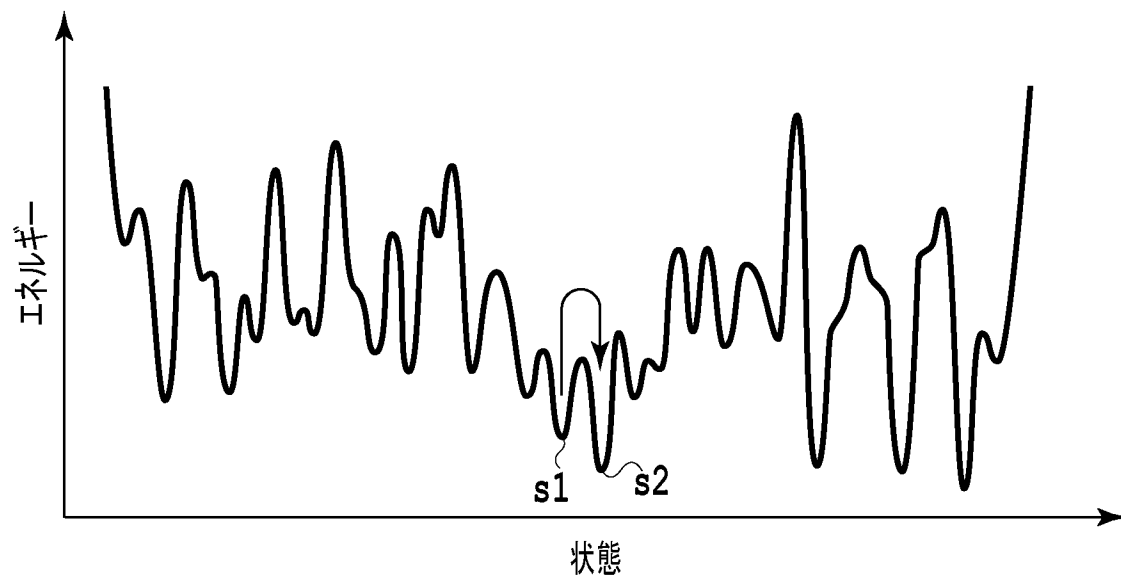
前記量子アニーリング模擬工程、前記熱的緩和導入工程、前記非断熱的遷移判断工程及び前記スピン状態更新工程は、連続して一連の処理を実現し、前記一連の処理を所定の時間繰り返した結果から、最適解を求める最適解取得工程と、

を含む、最適化方法。

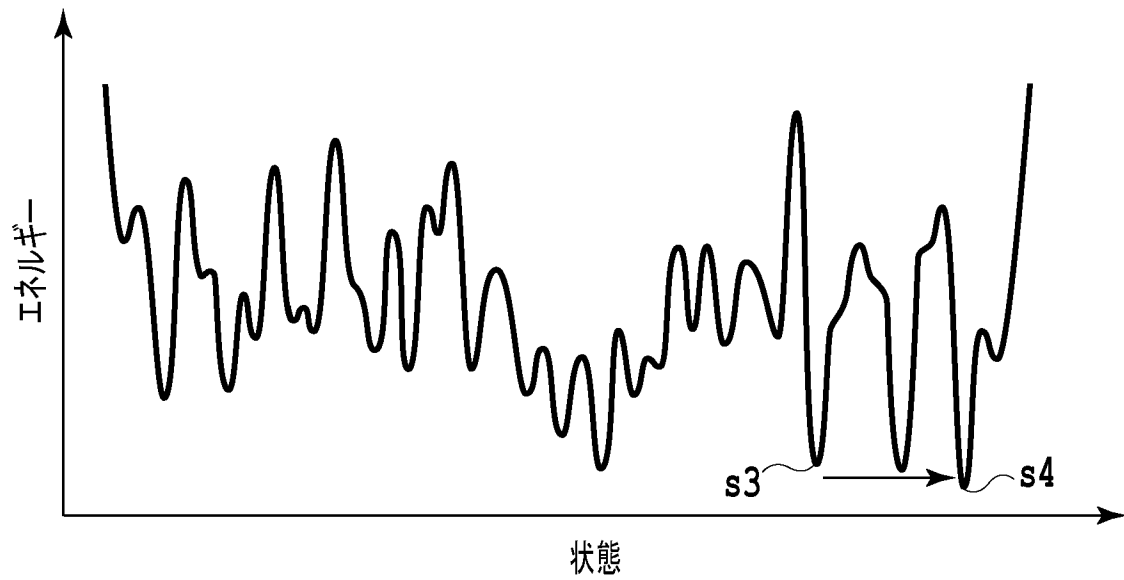
[図1]



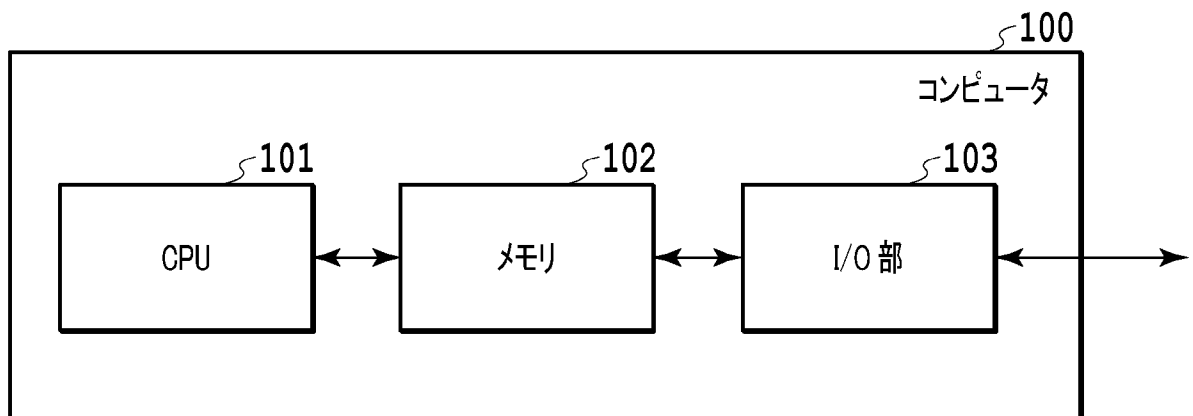
[図2]



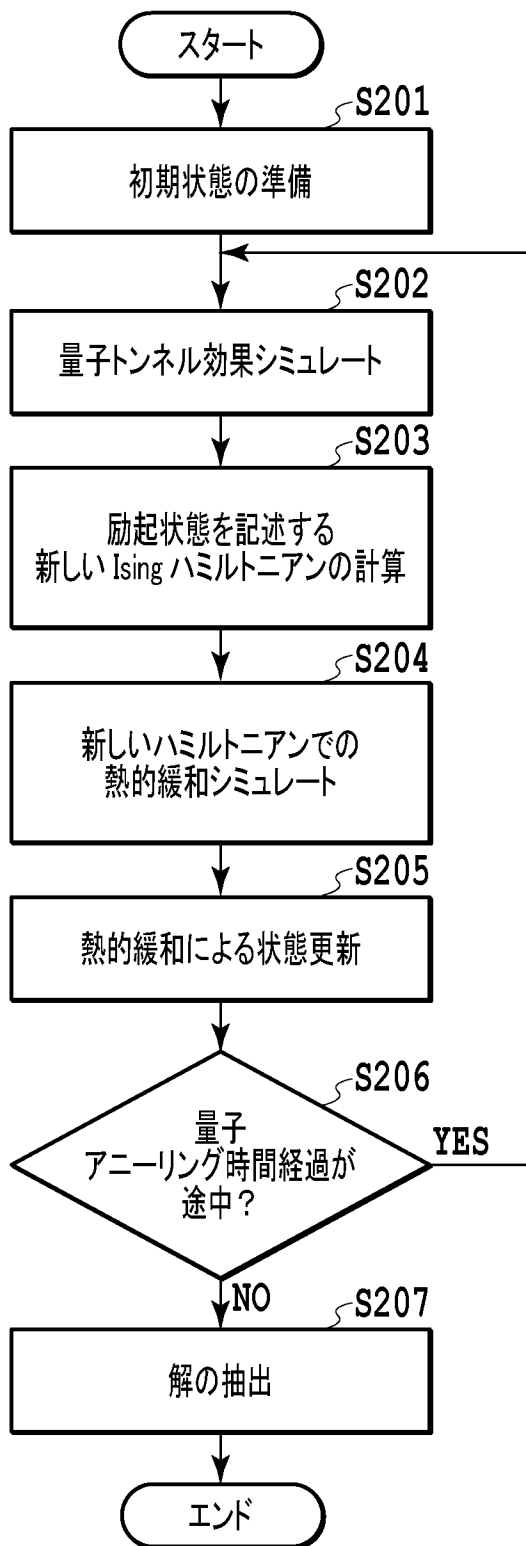
[図3]



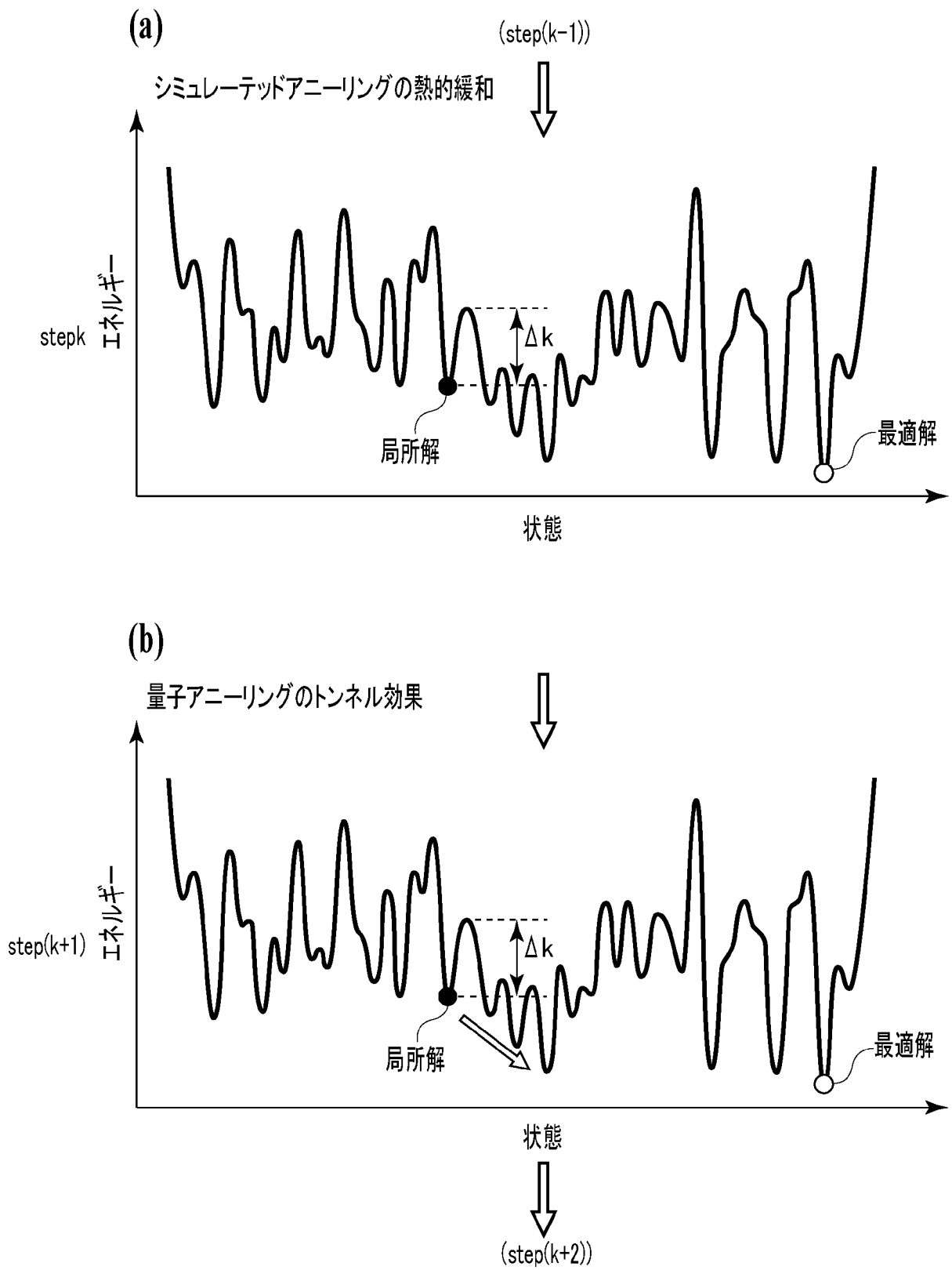
[図4]



[図5]



[図6]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/021249

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G06N 99/00**(2019.01)i

FI: G06N99/00 180

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06N99/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2019/176647 A1 (DENSO CORPORATION) 19 September 2019 (2019-09-19) paragraphs [0011]-[0048]	1
A	US 2023/0019942 A1 (HEWLETT PACKARD ENTERPRISE DEVELOPMENT LP) 19 January 2023 (2023-01-19)	1-9
A	JP 2022-62760 A (FUJITSU LIMITED) 21 April 2022 (2022-04-21)	1-9
A	GOTO, H. et al., High-performance combinatorial optimization based on classical mechanics, SCIENCE ADVANCES, February 2021, vol. 7, no. 6, pp. 1-9, [online], [retrieved on 08 August 2023], Retrieved from <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.abe7953> <doi: 10.1126/sciadv.abe7953> pp. 1-8	1-9
A	MISRA-SPIELDENNER, A. et al., Mean-Field Approximate Optimization Algorithm, arXiv: 2303.00329 [quant-ph], March 2023, pp. 1-17, [online], [retrieved on 08 August 2023], Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2303.00329> <doi: 10.48550/arXiv.2303.00329> pp. 1-16	1-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 August 2023

Date of mailing of the international search report

22 August 2023

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
Japan

Authorized officer

Telephone No.

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Document 1: WO 2019/176647 A1 (DENSO CORPORATION) 19 September 2019 (2019-09-19), paragraphs [0011]-[0048] & US 2020/0408547 A1, paragraphs [0022]-[0075] & DE 112019001278 T5

The claims are classified into the following two inventions.

Invention 1: Claim 1

Since there are no claims of the same category that comprise all of the invention-specifying features of the invention in claim 1, claim 1 is classified as invention 1.

Invention 2: Claims 2-9

Claims 2-8 share the common technical feature of "an optimization device for determining the optimal solution using thermal relaxation" with claim 1 classified as invention 1. However, in light of the disclosures in document 1 (paragraphs [0011]-[0048]) (document 1 (in particular, paragraphs [0011], [0038], and [0039]) discloses a global search device (that is, an "optimization device") for implementing the simulated annealing method (that is, "using thermal relaxation") and deriving an optimal solution A3 (that is, an "optimal solution")), said technical feature does not make a contribution over the prior art, and thus cannot be said to be a special technical feature. Moreover, there are no other same or corresponding special technical features between claims 2-8 and claim 1.

In addition, claims 2-8 do not depend from claim 1. Furthermore, claims 2-8 are not substantially identical to or similarly closely related to any of the claims classified as invention 1.

Such being the case, claims 2-8 cannot be classified as invention 1.

Claims 2-8 have the special technical feature of "an optimization device comprising an initial state creating unit for creating an initial state of a spin state on the basis of a random number, a quantum annealing simulation unit for causing a time development matrix to act on said initial state and repeatedly determining the state of the spin state that changes with the elapse of time, a thermal relaxation induction unit for generating an expected energy value comprising the state simulated by the quantum annealing simulation unit and an excited state of said state, a non-adiabatic transition determination unit for determining whether or not a non-adiabatic transition is occurring in the quantum annealing process on the basis of the expected energy value acquired by the thermal relaxation induction unit, and a spin state updating unit for updating the spin state when it is determined by the non-adiabatic transition determination unit that a non-adiabatic transition is occurring, wherein the quantum annealing simulation unit, thermal relaxation induction unit, non-adiabatic transition determination unit, and spin state updating unit are operated continuously to execute a series of processing, and the optimization device also comprises an optimal solution acquisition unit for determining an optimal solution from the results of repeating the series of processing for a prescribed period." Thus, the claims are classified as invention 2.

Since claim 9 is substantially identical to or similarly closely related to claim 2, said claim is classified as invention 2.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/021249

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

1. ☒ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☒ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2023/021249

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2019/176647	A1	19 September 2019	US 2020/0408547 A1 paragraphs [0022]-[0075] DE 112019001278 T5	
US	2023/0019942	A1	19 January 2023	(Family: none)	
JP	2022-62760	A	21 April 2022	US 2022/0114470 A1 EP 3982301 A1 CN 114417543 A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G06N 99/00(2019.01)i FI: G06N99/00 180														
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G06N99/00 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2023年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2023年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2023年</td> </tr> </table> 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2023年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2023年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2023年				
日本国実用新案公報	1922 - 1996年													
日本国公開実用新案公報	1971 - 2023年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2023年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2023年													
C. 関連すると認められる文献														
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号												
X	WO 2019/176647 A1 (株式会社デンソー) 19.09.2019 (2019 - 09 - 19) 段落[0011]-[0048]	1												
A	US 2023/0019942 A1 (HEWLETT PACKARD ENTERPRISE DEVELOPMENT LP) 19.01.2023 (2023 - 01 - 19)	1-9												
A	JP 2022-62760 A (富士通株式会社) 21.04.2022 (2022 - 04 - 21)	1-9												
A	GOTO, H. et al., High-performance combinatorial optimization based on classical mechanics, SCIENCE ADVANCES, 2021.02, Vol. 7, No. 6, pp. 1-9, [online], [retrieved on 2023-08-08], Retrieved from <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.abe7953> <doi: 10.1126/sciadv.abe7953> pp. 1-8	1-9												
A	MISRA-SPIELDENNER, A. et al., Mean-Field Approximate Optimization Algorithm, arXiv:2303.00329 [quant-ph], 2023.03, pp. 1-17, [online], [retrieved on 2023-08-08], Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2303.00329> <doi: 10.48550/arXiv.2303.00329> pp. 1-16	1-9												
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの</td> <td>“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの</td> <td>“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの	“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの	“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	“&” 同一パテントファミリー文献	“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	
* 引用文献のカテゴリー	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの	“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの													
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの													
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	“&” 同一パテントファミリー文献													
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献														
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献														
国際調査を完了した日 08.08.2023		国際調査報告の発送日 22.08.2023												
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 打出 義尚 5B 4440 電話番号 03-3581-1101 内線 3545												

第III欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

文献1：W0 2019/176647 A1（株式会社デンソー）19.09.2019(2019-09-19)
段落[0011]-[0048]
& US 2020/0408547 A1, 段落[0022]-[0075] & DE 112019001278 T5

請求の範囲は、以下の2つの発明に区分される。

（発明1） 請求項1

請求項1に係る発明の発明特定事項を全て含む同一カテゴリーの請求項はないので、請求項1を発明1に区分する。

（発明2） 請求項2－9

請求項2－8は、発明1に区分された請求項1と、「熱的緩和によって最適解を求める最適化装置」という共通の技術的特徴を有している。しかしながら、当該技術的特徴は、文献1（段落[0011]－[0048]）の開示内容（特に、文献1の段落[0011]，[0038]－[0039]には、シミュレーテッド・アニーリング法を適用して（すなわち「熱的緩和によって」）最適解A3（すなわち「最適解」）を導出する大域的探索装置（すなわち「最適化装置」）が記載されている。）に照らして、先行技術に対する貢献をもたらすものではないから、特別な技術的特徴であるとはいえない。また、請求項2－8と請求項1との間に、他に同一の又は対応する特別な技術的特徴は存在しない。

さらに、請求項2－8は請求項1の従属請求項ではない。また、請求項2－8は、発明1に区分されたいずれの請求項に対しても実質同一又はそれに準ずる関係にはない。

したがって、請求項2－8は発明1に区分できない。

そして、請求項2－8は「乱数に基づいてスピン状態の初期状態を作成する初期状態作成部と、前記初期状態に時間発展行列を作用させ、スピン状態の時間の経過に伴って変化する状態を繰り返し求める量子アニーリング模擬部と、前記量子アニーリング模擬部によって模擬された状態と、当該状態の励起状態と、を含むエネルギー期待値を生成する熱的緩和導入部と、前記熱的緩和導入部によって取得されたエネルギー期待値に基づいて、量子アニーリングの過程で非断熱的な遷移が生じているか否か判断する非断熱的遷移判断部と、前記非断熱的遷移判断部により前記非断熱的な遷移が生じていると判断された場合、スピンの状態を更新するスピン状態更新部と、を含み、前記量子アニーリング模擬部、前記熱的緩和導入部、前記非断熱的遷移判断部及び前記スピン状態更新部は、連続して動作して一連の処理を実現し、前記一連の処理を所定の時間繰り返した結果から、最適解を求める最適解取得部と、を含む、最適化装置」という特別な技術的特徴を有しているので、発明2に区分する。

請求項9は請求項2と実質同一又はそれに準ずる関係にあるので、発明2に区分する。

第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

1. ☒ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。
2. ☐ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。

追加調査手数料の異議の
申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- ☒ 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/021249

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
WO	2019/176647	A1	19.09.2019	US	2020/0408547	A1	
				段落[0022]-[0075]			
				DE	112019001278	T5	
US	2023/0019942	A1	19.01.2023	(ファミリーなし)			
JP	2022-62760	A	21.04.2022	US	2022/0114470	A1	
				EP	3982301	A1	
				CN	114417543	A	