

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6796213号

(P6796213)

(45) 発行日 令和2年12月2日(2020.12.2)

(24) 登録日 令和2年11月17日(2020.11.17)

(51) Int.Cl. F I
G06E 3/00 (2006.01) G O 6 E 3/00
G02F 3/00 (2006.01) G O 2 F 3/00

請求項の数 4 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2019-548828 (P2019-548828)	(73) 特許権者	000004226
(86) (22) 出願日	平成30年10月19日 (2018.10.19)		日本電信電話株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2018/038997		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(87) 国際公開番号	W02019/078355	(74) 代理人	110001243
(87) 国際公開日	平成31年4月25日 (2019.4.25)		特許業務法人 谷・阿部特許事務所
審査請求日	令和1年10月2日 (2019.10.2)	(72) 発明者	稲葉 謙介
(31) 優先権主張番号	特願2017-202986 (P2017-202986)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
(32) 優先日	平成29年10月19日 (2017.10.19)		本電信電話株式会社内
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)	(72) 発明者	武居 弘樹
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
			本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	本庄 利守
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日
			本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ポツツモデルの計算装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

イジングモデルの計算装置と、

前記イジングモデルの計算装置において、ある結合係数を設定したときに得られたイジングモデルのスピン値を保持するとともに、計算終了を判定する計算結果保持判定部と、

前記イジングモデルの計算装置に対して、前記保持されたスピン値に基づいて作成した結合係数を設定する結合係数設定部とを備えたポツツモデルの計算装置であって、

前記結合係数設定部は、前記イジングモデルの計算装置においてm回目に設定された結合係数に対応した計算結果として得られたイジングモデルのスピン値に応じて前記イ

ンジングモデルの計算装置に対してm+1回目に設定する結合係数を作成し直して設定し、
 前記計算結果保持判定部は、ポツツモデルの多値スピンの取り得る値が $S_i = 0, 1, 2, \dots, M-1$ (Mは自然数)であり、 $M \leq 2^{M_S}$ である場合に、 M_S (M_S は自然数)に応じた回数まで、前記結合係数設定部での結合係数の設定回数が到達した場合に、計算終了と判定して、m回目に設定された結合係数に基づいて計算結果として得られたスピンの値 σ_{im} を下記式に代入して得られる値 S_i を算出することにより、ポツツモデルにマッピングされた問題をイジングモデルを用いて算出することを特徴とするポツツモデルの計算装置。

【数 1】

$$S_i = \sum_{m=1}^{Ms} (1 + \sigma_{im}) 2^{m-2}$$

【請求項 2】

前記イジングモデルの計算装置は、

イジングモデルの複数のスピンの擬似的に対応し、同一の発振周波数を有する複数の光パルスを 0 または π の位相でパラメトリック発振させる位相感応増幅器と、

前記複数の光パルスを周回伝搬させるリング共振器と、

前記複数の光パルスが前記リング共振器を周回伝搬するたびに、前記複数の光パルスの位相および振幅を測定する、光パルス測定部と、

10

前記光パルス測定部において測定した光パルスの位相および振幅の情報を入力として、前記イジングモデルの結合係数と前記測定した光パルスとから決定される、ある光パルスに関わる相互作用を計算する相互作用計算部と、

前記相互作用計算部において計算された前記相互作用に基づいて、前記ある光パルスに対して、光パルスの振幅および位相を制御して重ね合わせるにより、前記イジングモデルの結合係数と前記測定した光パルスの位相および振幅とに基づいて決定される前記ある光パルスに関わる相互作用を実装する相互作用実装部と、

前記イジングモデルの結合係数を設定する問題設定部とを備え、

前記光パルス測定部は、前記光パルス測定部と前記相互作用計算部と前記相互作用実装部とにより構成されるフィードバックループ制御が繰り返される過程で、前記複数の光パルスが安定状態に到達した後に測定した前記複数の光パルスの位相を、イジングモデルのスピンの変換することにより、イジングモデルのスピンの値を得ることを特徴とする請求項 1 に記載のポッツモデルの計算装置。

20

【請求項 3】

前記相互作用計算部は、測定した N 個の光パルスの位相および振幅が c_{1m} 、 c_{2m} 、 c_{3m} 、 c_{4m} 、 $\dots$ 、 c_{im} 、 $c_{(N-1)m}$ 、 c_{Nm} を要素とする列ベクトルに対し、イジングモデルの結合係数を演算パラメータとする以下に示す行列を乗算して、得られた列ベクトルの要素 f_{1m} 、 f_{2m} 、 f_{3m} 、 f_{4m} 、 $\dots$ 、 f_{im} 、 $f_{(N-1)m}$ 、 f_{Nm} を前記 N 個の光パルスに対応する N 個のある光パルスに関わる相互作用として m を 1 から M_s まで変化させながら M_s 回演算することとを特徴とする請求項 2 に記載のポッツモデルの計算装置。

30

【数 2】

$$\begin{pmatrix} f_{1m} \\ f_{2m} \\ f_{3m} \\ \vdots \\ f_{(N-1)m} \\ f_{Nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1(N-1)} & K_{1N} \\ K_{21} & 0 & K_{23} & \dots & K_{2(N-1)} & K_{2N} \\ K_{31} & K_{32} & 0 & \dots & K_{3(N-1)} & K_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ K_{(N-1)1} & K_{(N-1)2} & K_{(N-1)3} & \dots & 0 & K_{(N-1)N} \\ K_{N1} & K_{N2} & K_{N3} & \dots & K_{N(N-1)} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{1m} \\ c_{2m} \\ c_{3m} \\ \vdots \\ c_{(N-1)m} \\ c_{Nm} \end{pmatrix}$$

ただし、 $K_{ij} = J_{ij}^m$ とする。

40

【請求項 4】

前記計算結果保持判定部は、1) 結合係数の設定を N 回繰り返した場合、2) m 回目の結合係数に対応する計算結果を得た時に、次に作成した結合係数が $J_{ij}^{m+1} = 0$ となった場合、3) m 回目の結合係数に対応する計算結果を得た時に、次に作成した結合係数が $J_{ij}^{m+1} = J_{ij}^m$ となった場合、のいずれかに該当すると判断したら、計算終了と判定することとを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれかに記載のポッツモデルの計算装置。

50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はポッツモデルを光パルスにより擬似的にシミュレーションしたポッツモデルの計算装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から知られているノイマン型のコンピュータでは、NP問題に分類される組合せ最適化問題を効率よく解くことができない。組合せ最適化問題を解く手法として、磁性材料を格子点の各サイトに配置されたスピンの相互作用として統計力学的に解析した格子模型であるイジングモデルを用いた手法が提案されている。

10

【0003】

イジングモデルの系のエネルギー関数であるハミルトニアンHは、以下の式(1)に示す通り表わされることが知られている。

【数1】

$$H = \sum_{ij} J_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (1)$$

【0004】

ここで、 J_{ij} は結合定数であり、イジングモデルを構成する各サイトの相関関係を示している。 σ_i 、 σ_j は各サイトのスピンを表しており、1または-1の値をとる。

20

【0005】

イジングモデルを用いて組合せ最適化問題を解く場合は、上記のイジングモデルのハミルトニアンにおいて、各サイトの相関関係である J_{ij} を与えたときに、系が安定状態となってエネルギーHの値が一番小さくなる σ_i を求めることにより、最適解が得られる。近年では、光パルスを利用して、こうしたイジングモデルを擬似的にシミュレーションすることにより、NP問題などの組合せ最適化問題を解くことができる計算装置が注目されている(特許文献1、非特許文献1)。

【0006】

図1は、イジングモデルの計算装置の基本構成を示す図である。イジングモデルの計算装置は、図1に示すように、リング共振器1として機能するリング状の光ファイバ内に設けられたPSA(位相感応増幅器: Phase Sensitive Amplifier)2に対して、ポンプ光パルス(pump)を注入することによりイジングモデルのサイト数に対応する数の光パルスの列を生成するように構成している(2値化OPO: Optical Parametric Oscillator: 0または π 位相の光パラメトリック発振器)。リング共振器1に入力された光パルス列が1周して再びPSA2に到達すると、再びPSA2にポンプ光が入力されることにより光パルス列が増幅される。最初のポンプ光の注入により発生する光パルス列は位相が定まらない微弱なパルスであり、リング共振器1内を周回するたびにPSA2で増幅されることによって、次第にその位相状態が定まる。PSA2は各光パルスをポンプ光源の位相に対し0または π の位相で増幅するので、これらのいずれかの位相状態に定まることになる。

30

40

【0007】

イジングモデルの計算装置では、イジングモデルにおけるスピンの1、-1を、光パルスの位相0、 π に対応させて実装している。光パルスの周回ごとに、リング共振器1外部の測定部3で光パルス列の位相および振幅の測定を行ない、その測定結果を、予め結合係数 J_{ij} を与えた演算器4に入力して、これらを用いてi番目のパルスに対する結合信号(フィードバック入力する信号)

【数 2】

$$\sum_j J_{ij} c_j$$

【0008】

(c_j : j 番目のサイトの光パルスの振幅) を演算する。さらに、外部光パルス入力部 5 により演算した結合信号に応じた外部光パルスを生成してリング共振器 1 内に入力するフィードバックループ制御により、光パルス列を構成する各光パルス間で位相に相関関係を付与することができる。

【0009】

10

イジングモデルの計算装置では、上記した相関関係を付与しながら光パルス列をリング共振器 1 内で周回増幅させて、安定状態となったときの光パルス列を構成する各光パルスの位相 0、 π を測定することにより、イジングモデルの解を求めることができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献 1】国際公開第 2015/156126 号パンフレット

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献 1】T. Inagaki, Y. Haribara, et al, "A coherent ising machine for 200 0-node optimization problems," Science 354, 603--606 (2016). 20

【非特許文献 2】Wu, Fa-Yueh (1982). "The Potts model". Rev. Mod. Phys. 54 (1): 235-268.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

ところで、イジングモデルの計算装置で解くことのできるイジング問題は 2 値のスピンのいずれかであることを解とする問題であるが、組合せ最適問題には、解とするスピンのとり得る値が 2 つより多い (多値の) いわゆるポッツ問題 (多値スピン問題) が数多く存在する。値が 2 つより多い多値のポッツ問題は、そのままでは 2 値問題を扱うイジングモデルの計算装置で解くことができない。しかしながら多値問題であるポッツ問題はその適用可能性が広く、ポッツ問題を解くためのポッツモデル (非特許文献 2) を計算可能な装置が望まれていた。 30

【0013】

本発明は、上記従来の問題に鑑みてなされたものであって、本発明の課題は、多値スピン問題であるポッツ問題を計算可能なポッツモデルの計算装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0014】

上記の課題を解決するために、一実施形態に記載の発明は、イジングモデルの計算装置と、前記イジングモデルの計算装置において、ある結合係数を設定したときに得られたイジングモデルのスピンの値を保持するとともに、計算終了を判定する計算結果保持判定部と、前記イジングモデルの計算装置に対して、前記保持されたスピンの値に基づいて作成した結合係数を設定する結合係数設定部とを備えたポッツモデルの計算装置であって、前記結合係数設定部は、前記イジングモデルの計算装置において m 回目に設定された結合係数に対応した計算結果として得られたイジングモデルのスピンの値に応じて前記イジングモデルの計算装置に対して $m+1$ 回目に設定する結合係数を作成し直して設定し、前記計算結果保持判定部は、ポッツモデルの取り得る値が $S_i = 0, 1, \dots, M-1$ (M は自然数) であり、 $M \leq 2^{Ms}$ である場合に、 Ms (Ms は自然数) に応じた回数まで、前記結合係数設定部での結合係数の設定回数が到達した場合に、計算終了と判定して、 m 回目に設定された結合係数に基づいて計算結果として得られたスピンの値 σ_{im} を下記式に代入して 40 50

得られる値 S_i を算出することにより、ポッツモデルにマッピングされた問題をイジングモデルを用いて算出することを特徴とするポッツモデルの計算装置である。

【数 3】

$$S_i = \sum_{m=1}^{M_s} (1 + \sigma_{im}) 2^{m-2}$$

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図 1】従来のイジングモデルの計算装置の基本構成を示す図である。

10

【図 2 A】例とした九州地方の各県をノードとして 8 色に塗り分ける問題をポッツ問題に置き換えた図である。

【図 2 B】図 2 A のポッツ問題を 3 層のグラフ問題に分解して示した図である。

【図 2 C】3 層のグラフ問題とポッツ相互作用との関係を説明するための図である。

【図 3】本実施形態のイジングモデルの計算装置の概略構成を示す図である。

【図 4】バランスドホモダイナミック検波器の構成例を示す図である。

【図 5】イジングモデルの計算装置の基本構成における処理フローである。

【図 6】ポッツモデルの計算装置の概略構成を示す図である。

【図 7 A】 $M = 2^{M_s}$ を満たさない多値の値 S_i の問題をポッツモデルの計算装置に実装するために定義した仮想ノードを示す図である。

20

【図 7 B】図 7 A で定義した仮想ノードを用いて色塗した図である。

【図 7 C】図 7 B をレイヤーで表現した図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、本発明の実施の形態について、詳細に説明する。

(ポッツモデルについて)

【0017】

本実施形態のポッツモデルの計算装置において扱うポッツ問題（多値スピン問題）は、ポッツモデルと呼ばれる次式（2）のハミルトニアンを用いて解くことができる。次式（2）において、ポッツモデルを構成する各サイト（ノード） i の多値スピンの値を S_i （ $S_i = 0, 1, 2, 3, \dots, M-1$: M は多値数を示す自然数）、ポッツモデルを構成する各サイト（ノード）の相関関係を示す結合定数を J_{ij} （ $i, j = 1, 2, \dots, N$: 各サイトを表すインデックス、 N はサイト数を示す）と示しており、多値スピンの値 S_i を持つサイト i に対して相互作用を考えるサイト j の多値スピンの値を S_j とすると、 $\delta(S_i - S_j)$ は、 $S_i = S_j$ の時にだけ 1 となりそれ以外は 0 となる、いわゆるクロネッカーのデルタである。

30

【数 4】

$$H_{\text{Potts}} = \sum_{ij} J_{ij} \delta(S_i - S_j) \quad (2)$$

40

【0018】

ポッツ問題を解く場合、上記式（2）において、 J_{ij} に解くべき問題がマッピングされる。多値スピン問題を記述する上記式（2）は、多値数 $M = 2^{M_s}$ と表せる場合に、 m を 1 から M_s までの次数として、次数が m の 2 値のスピン $\sigma_{im}, \sigma_{jm} = (\pm 1)$ を用いて次式（3）のように書き換えることができる。ここで σ_{jm} は、次数 m の 2 値スピンの値が σ_{im} となるサイト i に対して、相互作用を考えるサイト j の 2 値スピンの値を示している。

【数 5】

$$H_{\text{Potts}} = \sum_{ij} J_{ij} \prod_{m=1}^{M_s} \left(\frac{1 + \sigma_{im} \sigma_{jm}}{2} \right) \quad (3)$$

50

【0019】

上記式(3)は、総乗積の項を分解すると、次式(4)に示すように記述できる。

【数6】

$$H_{\text{Potts}} = \sum_{ij} J_{ij} \left(\frac{1+\sigma_{i1}\sigma_{j1}}{2} \right) \left(\frac{1+\sigma_{i2}\sigma_{j2}}{2} \right) \left(\frac{1+\sigma_{i3}\sigma_{j3}}{2} \right) \dots \quad (4)$$

【0020】

上記式(4)によれば、(3)式の総乗積の項は M_s 個の $(1+\sigma_{im}\sigma_{jm})/2$ の項の積に分解できることが判る(m は1から M_s の自然数)。この各 m 次の項における $(1+\sigma_{im}\sigma_{jm})/2$ は、定数の足し算と掛け算を除いて、(1)式であらわされる2値のイジング問題と等価である(定数項はイジング問題に影響を与えない)。すなわち、多値数 M ($=2^{M_s}$)のポッツ問題は、 M_s 個の2値イジング問題の積に置き換えられるといえる。具体的には、多値スピンの相互作用(ポッツ相互作用)を導くためには、各 m 次の項の2値スピン σ_{im} 、 σ_{jm} 間のイジング相互作用(第1の相互作用)とともに、この第1の相互作用同士の総乗積で与えられる相互作用(第2の相互作用)を考慮する必要があるといえる。このとき、互いにポッツ相互作用を有する多値スピンの値 S_i は、上記式(3)、(4)における M_s 個の m 次の2値のスピン σ_{im} を用いて、次式(5)に示すように表すことができる。

10

【数7】

$$S_i = \sum_{m=1}^{M_s} (1 + \sigma_{im}) 2^{m-2} \quad (5)$$

20

【0021】

したがって、上記式(3)、(4)に示すようなポッツ相互作用を有する2値のスピン σ_{im} を取り得るサイトが安定状態となる時の m 次の2値のスピン σ_{im} の値を求めることによって、ポッツ問題で解くべき多値のスピン S_i の値を求めることができるといえる。また式(3)、(4)から、多値のスピンは、 N 個の2値のスピン σ_{im} 、 σ_{jm} ($i, j = 1, 2, \dots, N$:各サイトを表すインデックス、 N はサイト数を示す)の値のセットを M_s 個求めることで決定できるといえる。すなわち、2値のスピン σ_{im} 、 σ_{jm} ($i, j = 1, 2, \dots, N$)を光パルスの位相(例えば0、 π)に置き換え(擬似的にシミュレーションし)、さらにこれらの光パルスの位相にポッツ相互作用を持たせることにより、ポッツモデルにマッピングされた問題を計算することができるといえる。

30

【0022】

このポッツモデルの変形を地図塗り分け問題を例に挙げてさらに説明する。九州地方を8色に塗り分けるとすると、塗りわけに用いる各色に0から7までの値を割り当てた多値問題と考えることができるが、 $M = 8 = 2^3$ 、すなわち、 $m = 1, 2, 3$ の3次の2値のスピン σ_{im} 、 σ_{jm} ($i, j = 1, 2, \dots, N$:各サイトを表すインデックス、 N はサイト数を示す)を用いて表すことができる。

【0023】

図2A、図2B、および図2Cは例とした九州地方の各県をノードとして8色に塗り分ける問題におけるポッツ相互作用を説明する図である。3次の2値のスピン σ_{im} 、 σ_{jm} において互いに相互作用を持つポッツ相互作用は、各ノードの相互作用を考えるための図2Aに示すグラフを3層にコピーした図2Bに示すモデルで説明することができる。この塗り分け問題では、2つのノード(県)が隣接するかどうかを相関関係として J_{ij} に設定する。これが解くべき問題となる。例えば、長崎県を1、佐賀県を2とすると、この2つの県は互いに隣接するので、相関関係として隣接することを示す $J_{12} = 1$ が設定される。図2Aおよび図2Cにおいては、長崎県と佐賀県とが太線で接続されているが、これが相関関係を示している。

40

【0024】

まず、図2Bに示すグラフの各層において、特定の隣接する2つのノードについて考え

50

る。2つのノードのスピンの値が同じ場合は相互作用があり、異なる場合は相互作用がないと判断する。この隣接する2つのノードにおける相互作用の有無を3層のそれぞれにおいて判断し、いずれか1つの層において「相互作用がない」と判断された場合は、その2つのノードはポッツ相互作用がないと判断する。すなわち、図2Cに示すように隣接するノードと全ての層において値が一致する場合にポッツ相互作用があると判断することができる。

【0025】

8色塗り分け問題では、各ノードは8つの値を取りうるが、隣接するノードは異なる色でなければならない。言い換えると、隣接するノードは、ポッツ相互作用のない状態となる時のノードの各層の値(±1)を式(5)に代入して得られる多値の S_i が問題に対する解となる。

【0026】

この問題で説明した複数層のグラフにおける各層の値(±1)を光パルスの位相(例えば0、 π)に置き換える(擬似的にシミュレーションする)ことにより、多値問題を解くことができることが判る。

【0027】

(第1の実施形態)

図3は、本実施形態のポッツモデルの計算装置の概略構成を示す図である。図3において、ポッツモデルの計算装置は、リング状の光ファイバで構成されたリング共振器1と、リング共振器1内に設けられた、PSA(位相感応増幅器)2と、リング共振器1から分岐された、フィードバックループの一部を構成する、測定部3、演算器4、外部光パルス入力部5と、結合係数に対応する計算結果を保持すると共に計算終了を判定する計算結果保持判定部6と、測定部3に応じて演算器4に書き込まれた J_{ij} の値を書き換えることにより結合係数を設定する結合係数設定部7とを備えている。本実施形態のポッツモデルの計算装置では、測定部3と演算器4と外部光パルス入力部5とがフィードバックループを構成している。本構成では、リング共振器1と、PSA2と、測定部3と、演算器4と、外部光パルス入力部5とは、いわゆるイジングモデルの計算装置を構成している。計算結果保持判定部6および結合係数設定部7は、CPUおよびメモリなどの記憶手段を備えた外部のコンピュータなどによって構成することができる。

【0028】

PSA2は、イジングモデルの複数のスピンの擬似的に対応し、同一の発振周波数を有する複数の光パルスの列(光パルス列)をポンプ光源(厳密にはポンプ光パルス生成に用いる局発光)の位相に対して0または π の位相の光を効率よく増幅する。PSA2は、例えば2次の非線形光学効果を発現する周期的分極反転ニオブ酸リチウム(periodically poled lithium niobate: PPLN)などの非線形光学結晶を用いて構成することができる。

【0029】

PSA2は、シグナル光(信号光)とポンプ光(励起光)が入力されると、ポンプ光源の位相に対して0または π の位相の微弱なパルス(アイドラ光)を発生する。PSA2では、最初にシグナル光が発生していない状態でポンプ光のみを入力した場合でも、自然放出光として微弱なパルス(雑音光パルス)を発生することができる。

【0030】

PSA2では、周波数 ω を有する局部発振光(LO光)を第2高調波発生器により2倍波である周波数 2ω に変換したポンプ光が入力されると、(これまでポンプ光が無く、まさにポンプを入れ始めた時には)パラメトリック下方変換過程により微弱な雑音光が発生する。さらに、PSA2では、リング共振器1内を周回伝搬した光パルス列が再び入力されたとき、かかる光パルス列がシグナル光

【数8】

$$E_s = A_s e^{i(\omega_s t + \theta_s)}$$

10

20

30

40

50

となり、このシグナル光に完全に位相整合したポンプ光

【数 9】

$$E_p = A_p e^{i\omega_p t}$$

がさらに P S A 2 に入力されると、2 次の非線形光学効果である O P O（光パラメトリック発振）により、シグナル光 E s の位相共役波となるアイドラ光

【数 10】

$$E_i = A_i e^{i\{(\omega_p - \omega_s)t - \theta_s\}}$$

が発生する。

10

【0031】

このとき、シグナル光とアイドラ光の周波数が一致する場合、以下の縮退波が出力される。

【数 11】

$$E_s = A_s e^{i(\omega_s t + \theta_s)} + A_s e^{i(\omega_s t - \theta_s)} = 2 A_s e^{i\omega_s t} \cos \theta_s$$

【0032】

この出力される縮退波は、位相共役の関係にあるシグナル光とアイドラ光との重ね合わせなので、位相が 0 または π の波が効率よく増幅されることになる。こうして、P S A 2 では当初発生した微弱な光パルス列のうち、0 または π の位相成分が増幅されることになる。

20

【0033】

リング共振器 1 は、P S A 2 で発生した複数の光パルス（光パルス列）を周回伝搬させる。リング共振器 1 は、リング状の光ファイバで構成することができ、その光ファイバの長さは、（光パルス列を構成するパルスの数）×（パルス間隔）にフィードバック処理にかかる時間分の長さを加えたものに設定される。

【0034】

測定部 3 は、複数の光パルス（光パルス列）がリング共振器 1 を周回伝搬するたびに（1 周回毎に）、その複数の光パルスの位相および振幅を測定する光パルス測定部として機能する。具体的には測定部 3 は、リング共振器 1 内を伝搬する光パルス列を分岐してその振幅を含めた位相状態をコヒーレント測定する。コヒーレント測定は、バランスドホモダイン検波器を用いて被測定光として入力される光パルス列の振幅と位相を測定することができる。

30

【0035】

図 4 はバランスドホモダイン検波器 30 の構成例を示す図である。バランスドホモダイン検波器 30 は、測定する光パルス列と同じ周波数の位相同期した光を基準光として、光パルス列を構成する光に干渉させて、その振幅と位相状態を測定することができる。バランスドホモダイン検波器 30 は、ポート 1 およびポート 2 から光を干渉させてポート 3 およびポート 4 に出力するハーフミラー 31 と、ポート 3 から出力される光を検出する第 1 の光検出器 32 とポート 4 から出力される光を検出する第 2 の光検出器 33 と、第 1 および第 2 の光検出器 32、33 の検出結果の差分を演算する差分演算部 34 とを有している。

40

【0036】

ポート 1 には被測定光として光パルス列 $E_s e^{i(\omega t + \theta)}$ が入力され、ポート 2 には、振幅と位相が既知である基準光 $E_{L0} e^{i\omega t}$ が入力される。ポート 1 から入力された光パルス列は、ハーフミラー 31 において、同位相でポート 3 に向けて透過する成分と、位相が π だけ変化させられてポート 4 に向けて反射される成分に分岐する。ポート 2 から入力された基準光は、ハーフミラー 31 において、同位相でポート 4 に向けて透過する成分と、同位相でポート 3 に向けて反射される成分に分岐する。

50

【0037】

ポート1から入力された光パルス列の同位相成分とポート2から入力された基準光の同位相成分とが干渉した出力光

【数12】

$$E_3 = \frac{E_{LO}}{\sqrt{2}} e^{i\omega t} + \frac{E_S}{\sqrt{2}} e^{i(\omega t + \theta)}$$

がポート3から出力され、第1の光検出器32では、光強度

【数13】

$$|E_3|^2 = \frac{E_{LO}^2 + E_S^2}{2} + E_{LO} E_S \cos \theta$$

10

を示す電気信号が検出される。

【0038】

ポート1から入力された光パルス列の逆位相成分とポート2から入力された基準光の同位相成分とが干渉して出力光

【数14】

$$E_4 = \frac{E_{LO}}{\sqrt{2}} e^{i\omega t} - \frac{E_S}{\sqrt{2}} e^{i(\omega t + \theta)}$$

がポート4から出力され、第2の光検出器33では、光強度

【数15】

$$|E_4|^2 = \frac{E_{LO}^2 + E_S^2}{2} - E_{LO} E_S \cos \theta$$

20

で表される電気信号が検出される。

【0039】

さらに、差分演算部34では、第1の光検出器32における検出信号と第2の光検出器33における検出信号との差分が演算されて、 $2 E_{LO} E_S \cos \theta$ が出力される。

【0040】

したがって、基準光の振幅 E_{LO} が既知であるので、測定結果として位相の $\cos$ 成分（符号のみ）と振幅を含んだ値 $\pm E$ が得られることとなる。

【0041】

測定結果として得られる値は、符号つきアナログ値（ $\pm E$ ）であり、符号（ $\pm$ ）が位相（0及び π ）を示し、アナログ値（ E ）が振幅を示すことになる。

30

【0042】

図3に戻ると、演算器4は、測定した光パルスの位相および振幅に関する情報を入力として、イジングモデルにマッピングされた結合係数および他の光パルスの位相および振幅に関する情報に基づいて、光パルスが関わる相互作用を計算する。演算器4で演算される相互作用は、位相および振幅に関する情報の特定の成分のみの測定値に基づいて演算される。

【0043】

具体的には演算器4は、測定部3で測定した光パルス列の振幅と位相に関する情報に対して、結合係数を与える演算を行なう。演算器4としては例えばFPGAを用いることができる。演算器4では、以下に示す式（6）に従って演算を行なう。

40

【数16】

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} \\ J_{21} & 0 & J_{23} & J_{24} & J_{25} \\ J_{31} & J_{32} & 0 & J_{34} & J_{35} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & 0 & J_{45} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{pmatrix} \quad (6)$$

【0044】

上式において、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 はそれぞれ測定部3における各パルスについ

50

ての測定結果であり、 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 はそれぞれ演算結果として得られる相互作用である。行列の演算パラメータ J_{12} 、 J_{13} 、 J_{14} 、 J_{15} 、 $\dots$ 、 J_{53} 、 J_{54} は、イジングモデルにマッピングされた結合係数であり、解を求めようとする問題に応じて決定される。ただし、本実施形態のポツモデルの計算装置では、与えられた多値の問題を解くまでに結合係数は複数回変更される。

【0045】

上式に示すように、演算器4では、測定部3における測定結果を要素とする列ベクトルを生成し、生成した列ベクトルに対して行列を乗算する演算を行ない演算結果として相互作用を得る。なお、ここでは光パルス列を構成する光パルスの数と等しいサイト数が5の場合を例に挙げて説明しているが、サイト数に応じて用いる正方行列の大きさが決まる。正方行列は（サイト数） $\times$ （サイト数）の大きさとなる。

10

【0046】

例えば、サイト数（光パルス列を構成する光パルスの数）をNとすると、相互作用計算部は、次の（7）に示す行列の演算を行なう。

【数17】

$$\begin{pmatrix} f_{1m} \\ f_{2m} \\ f_{3m} \\ \vdots \\ f_{(N-1)m} \\ f_{Nm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1(N-1)} & K_{1N} \\ K_{21} & 0 & K_{23} & \cdots & K_{2(N-1)} & K_{2N} \\ K_{31} & K_{32} & 0 & \cdots & K_{3(N-1)} & K_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ K_{(N-1)1} & K_{(N-1)2} & K_{(N-1)3} & \cdots & 0 & K_{(N-1)N} \\ K_{N1} & K_{N2} & K_{N3} & \cdots & K_{N(N-1)} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{1m} \\ c_{2m} \\ c_{3m} \\ \vdots \\ c_{(N-1)m} \\ c_{Nm} \end{pmatrix}$$

ただし、 $K_{ij} = J_{ij}^m$ とする。

20

(7)

30

【0047】

外部光パルス入力部5は、位相および振幅の特定の成分のみ測定した光パルスの位相および振幅に基づいて演算された演算結果を用いて、リング共振器1内の光パルスに対して重ね合わされる光パルスの振幅および位相を制御することにより、光パルスが関わる相互作用の大きさおよび符号を実装する。外部光パルス入力部5は、例えば、光パルスの振幅および位相を制御して出力するレーザを用いて構成することができる。演算結果は、位相および振幅の特定の成分のみであるので、位相および振幅の特定の成分のみの相互作用が実装されることとなる。

【0048】

具体的には外部光パルス入力部5は、リング共振器1内の光パルス列と同じ周波数である光パルス列を演算結果に比例する振幅および位相で同期して合波する。例えば、外部光パルス入力部5が、一定の周波数の外部パルスを同期して入力することによって、リング共振器1内の光パルス列と周波数が一致したパルスを同期して入力することができる。リング共振器1内の光パルス列に対して演算結果に応じた外部パルスを合波することにより、リング共振器1内の光パルス列に擬似的な相互作用を与えることができる。

40

【0049】

このように外部光パルス入力部5によりフィードバック入力する構成によれば、i番目の光パルスのcos成分 c_i 、共振器周回数n、外部パルスの比率Kを用いて、フィードバック後の光パルス列の信号 $c'_i(n)$ は以下に示す式（8）で表される。

【数 1 8】

$$c_i'(n) = c_i(n) + K f_i(n) \quad (8)$$

【0 0 5 0】

以上の式では、リング共振器 1 内の光パルス列 $c_i(n)$ に対して結合比率 K で外部光パルス入力部 5 による外部光パルス列(フィードバック入力する成分)

【数 1 9】

$$\sum_j^N J_{ij} c_j(n)$$

が合波されたものが、フィードバック後の光パルス列 $c_i'(n)$ となることが示されている。

【0 0 5 1】

上式で示される光パルス列 $c_i'(n)$ が再び P S A 2 に入力すると増幅されて光パルス列 $c_i(n+1)$ となる。以上の構成により、ポッツモデルの計算装置では、増幅とフィードバックを繰り返しながら、光パルス列を問題に応じた安定状態に導いていくことにより、結合係数に対応する計算結果を得る。

【0 0 5 2】

計算結果保持判定部 6 は、上記の増幅とフィードバックを所定回数繰り返して光パルス列を問題に応じた安定状態に導いた時に、測定部 3 で測定した測定結果に基づいて、光パルス列の位相をスピンの値に置き換えた計算結果(すなわち $\text{sign}(c_i) = \pm 1$)を保持する。

【0 0 5 3】

さらに計算結果保持判定部 6 は、与えられたポッツ問題を解くために必要な回数、上記の構成により増幅とフィードバックを繰り返して安定状態に導く計算(結合係数設定部 7 における結合係数の設定)を繰り返した場合に計算終了と判定する。本実施形態のポッツモデルの計算装置では、解として取り得る多値の値が $M = 2^{Ms}$ で表される場合に、最低 M s 回の結合係数の設定をすればよい。計算を終了する場合は、最終的に、それまで保持した計算結果に基づいて、ポッツモデルの多値スピンの値を算出する。

【0 0 5 4】

計算結果保持判定部 6 は、所定の終了条件に該当する場合は、結合係数の設定回数が M s 回に満たない場合でも、結合係数の設定を終了することができる。所定の終了条件は、1) $m = M$ s 回まで繰り返した場合、2) m 回目の結合係数の計算結果を得た時に、次に作成した結合係数が $J_{ij}^{m+1} = 0$ となった(つまり、 $J_{ij}^m \neq 0$ となる (i, j) 上の全ての $\text{sign}(c_{im} c_{jm}) = -1$) 場合、3) m 回目の結合係数の計算結果を得た時に、次に作成した結合係数が $J_{ij}^{m+1} = J_{ij}^m$ (つまり、 $J_{ij}^m \neq 0$ となる (i, j) 上の全ての $\text{sign}(c_{im} c_{jm}) = 1$) 場合が挙げられ、上記に該当する場合は、結合係数の設定回数が M s 回に満たない場合でも、結合係数の設定を終了する。 M や M s の値が未定の結合係数でも、この計算結果に基づいて計算を終了するアルゴリズムにより、 M や M s の値を求めることもできる。

【0 0 5 5】

結合係数設定部 7 は、繰り返し結合係数を演算部 3 に設定する。具体的には、結合係数設定部 7 は、1 回目の結合係数を $J_{ij}^{m+1} = J_{ij}$ と設定し、2 回目以降($m+1$ 回目)の結合係数は、前回(m 回目に)実行した計算結果の i 番目のパルスの直交成分 c_{im} および j 番目のパルスの直交成分 c_{jm} を用いて、 $J_{ij}^{m+1} = J_{ij}^m \times (1 + \text{sign}(c_{im} c_{jm})) \times 1/2$ と設定する。このように設定することによって、測定したスピンの値が一致しないノード間の相関を計算対象から外すように J_{ij} を再作成することができる。

【0 0 5 6】

結合係数設定部 7 において結合係数を設定した後、再度 P S A 2 による雑音光パルス列を発生し、安定状態に導く計算を繰り返す。ポッツモデルを 2 進数的に表したときの次数

10

20

30

40

50

M_s の数だけ（終了条件に該当する場合はそれよりも少ない数だけ）安定状態に導く計算を繰り返して、計算結果保持判定部6は、複数回設定した結合係数に対する計算結果として得られた複数個のスピンの値 σ_{im} を式（5）に代入して得られた値をポッツモデルの解とする。

【0057】

図5は、ポッツモデルの計算装置の基本構成における処理フローである。図5に示すように、ポッツモデルの計算装置では、ポッツモデルの計算を始めるにあたって結合係数設定部7により結合係数が設定された（設定回数 $m=1$ ）後、最初にPSA2に対してポンプ光が注入されると、微弱な雑音光パルス列が発生し（S1）、発生した雑音光パルス列はリング共振器1内を周回伝搬する。リング共振器1内を周回伝搬する光パルス列の一部が分岐され、測定部3によりその振幅および位相がコヒーレント測定される（S2）。 10

【0058】

光パルス列の測定結果が得られると、演算器4において、解を求めるべき問題に応じた結合係数がマッピングされた行列により相互作用が演算される（S4）。外部光パルス入力部5は、演算結果を受け取ると、演算結果に応じた位相と振幅を有する外部光パルスをリング共振器1に入力して、リング共振器1内の光パルス列に合波させることにより光パルス列に対するフィードバックを与える（S5）。

【0059】

フィードバック後の光パルス列は、再びPSA2に入力され、光パルス列に同期したポンプ光により増幅され（S6）、再びリング共振器1内を周回伝搬する。リング共振器1内を再び伝搬する光パルス列に対して、再びコヒーレント測定、行列による演算、演算結果に応じたフィードバックが施されることが繰り返される。 20

【0060】

このような光パルス列に対する増幅とフィードバックが所定回繰り返される（S3）と、光パルス列の状態が安定状態となる。計算結果保持判定部6は、安定状態となることによって得られた計算結果（測定部3において得られた測定結果の位相状態である0または π をイジングモデルのスピン σ 状態（ ± 1 ）に置き換えて）を保持し（S7）、解くべき問題の計算を開始してから安定状態に到達した回数が解くべき問題の次数 M_s と一致したか否かおよび終了条件が判定され（S8）、次数と一致しておらず終了条件にも該当しない場合（S8：No）は、安定状態となった時に測定部3において得られた測定結果の位相状態である0または π に基づいて J_{ij} を再作成して、作成した J_{ij} を演算器4に設定し（S9）、再度PSA2による雑音光パルス列を発生して（S1）、測定とフィードバックと増幅を繰り返して安定状態に導いていく（S1からS6の繰り返し）。 30

【0061】

最終的には、安定状態に到達した回数が解くべき問題の次数と一致するか、終了条件に該当し（S8：Yes）、安定状態となった時に測定部3において得られた測定結果の位相状態である0または π をイジングモデルのスピン σ 状態（ ± 1 ）に置き換えて、解くべき問題にマッピングし直すことによって与えられた問題に対する解が得られることとなる。

【0062】

本実施形態においては、リング共振器1と、PSA2と、測定部3と、演算器4と、外部光パルス入力部5とは、イジングモデルの計算装置を構成している場合を例に挙げて説明したが、イジングモデルの計算装置の構成はこれに限定されない。 40

【0063】

（第2の実施形態）

図6は、本実施形態のポッツモデルの計算装置の概略構成を示す図である。第1の実施形態のポッツモデルの計算装置では、多値数 M が2のべき乗 2^{M_s} （ M_s は自然数）で表される場合であればそのまま扱うことができたが、この式を満たさない例えば $M=3$ などの場合は、そのままではポッツモデルの計算装置に実装することができない。図6に示すように、本実施形態のポッツモデルの計算装置では、他の全てのノードと相関関係を有する 50

仮想ノードを導入することにより、第1の実施形態のポッツモデルの計算装置の構成における結合係数設定部7に調整手段71を設けた構成としている。この構成により、 $M = 2^{M_s}$ を満たさない多値数の問題を計算可能としている。

【0064】

調整手段71は、与えられた問題の「ノード数」と「各ノードがとり得る値」と「ノード間の相関関係」を調整して、調整した問題に応じた J_{ij} を設定する。具体的には、ノード数が「N」で各ノードのとり得る値がMという結合係数が与えられた場合、調整手段71は、 $M \leq 2^{M_s}$ を満たす最小の M_s で決められる 2^{M_s} を各ノードがとり得る値とし、仮想のノードを D_n ($D_n = 2^{M_s} - M$; Mは自然数)個だけ定義して、これを与えられた問題のノード数(N)に加えることによって問題のノード数を $(N + D_n)$ とする。さらに、新しく導入した仮想のノードについては他の全てのノードに対して相関関係(結合)を有するものとして、 J_{ij} のマッピングを行う。例えば、各ノードにおける値は、結合関係にあるノードとは異なる値になるような場合、仮想のノードは他の全てのノードに対して結合を有するので、解として得られる仮想のノードのとり得る値は他の全てのノードとは異なる値となることは明らかである。したがって、仮想ノード以外のノードに残りの多値(元々問題と設定されていた多値)が割り当てられることとなる。

10

【0065】

図7A、図7B、および図7Cは $M = 2^{M_s}$ を満たさない多値の値 S_i の問題をポッツモデルの計算装置に実装する手法を説明する図である。例えば、九州地方の7県(ノード数7)を3色に塗り分ける色塗り分け問題を解く場合、多値数Mは3となり、 $M = 2^{M_s}$ を満たさないので、この問題はそのまま第1の実施形態のポッツモデルの計算装置に実装することができない。

20

【0066】

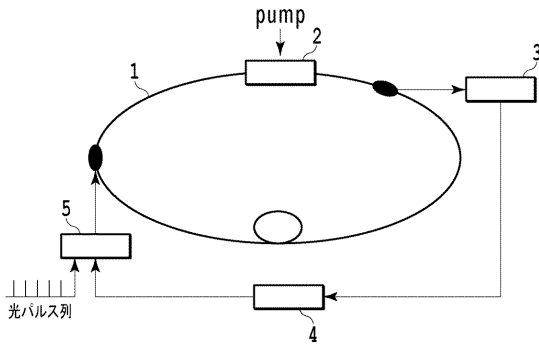
調整手段71は、九州地方の7県(ノード数7)を3色に塗り分ける色塗り分け問題が入力されると、取りえる値の数は $M = 3 \leq 2^2$ から4であり、仮想ノード数は $D_n = 2^2 - 3 = 1$ なので、仮想ノードを1つ定義する。さらに調整手段71は、ノード数を問題として入力されたノード数より1つ(仮想ノード数)多いノード数8とし、塗りわけに用いる色を実際に用いる色よりも1色多い数の4の問題であると調整して、 J_{ij} を作成し、作成した J_{ij} を演算器4にマッピングする。このとき、図7Aに示すように、仮想ノードは、他の全てのノードに結合したものとして相関関係 J_{ij} が作成される。図7Cに示すように、このとき必要なグラフ数(結合係数の設定回数)は $M_s = 2$ であるので2となる。

30

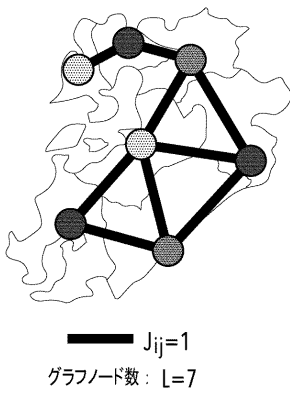
【0067】

このように設定することで、図7Bに示すように、仮想ノードには他の7つのノードとは異なる色が導かれることになる。言い換えると、塗り分けの対象であった7つのノードは、3色で塗り分けられることが判る。

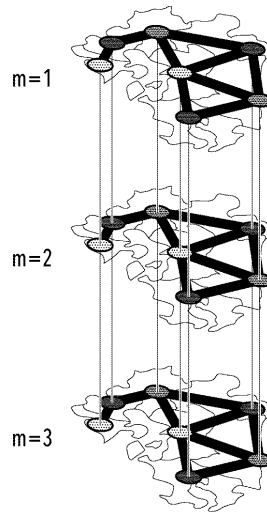
【図 1】



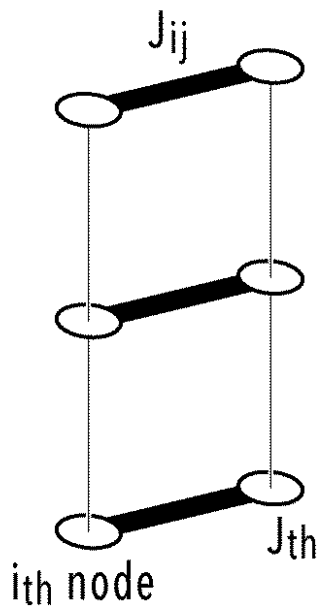
【図 2 A】



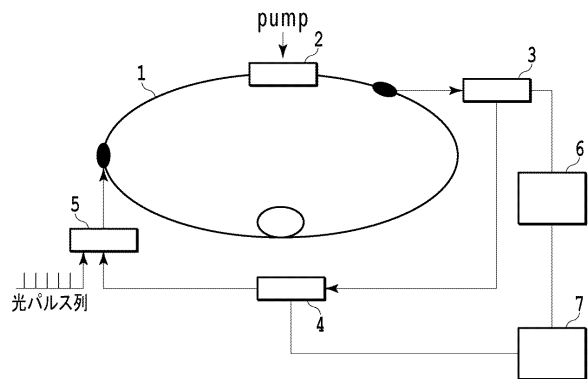
【図 2 B】



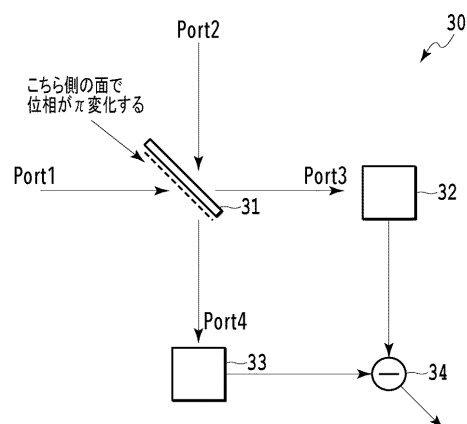
【図 2 C】



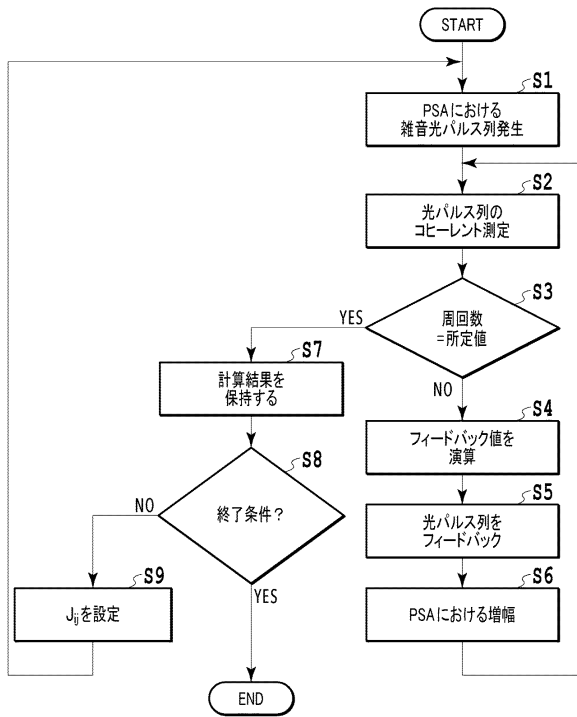
【図 3】



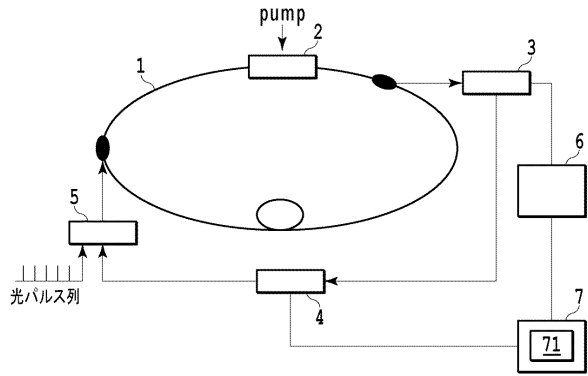
【図 4】



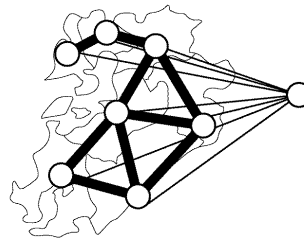
【図 5】



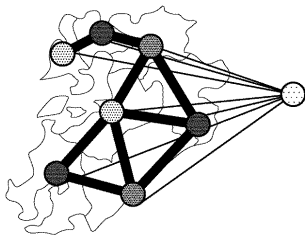
【図 6】



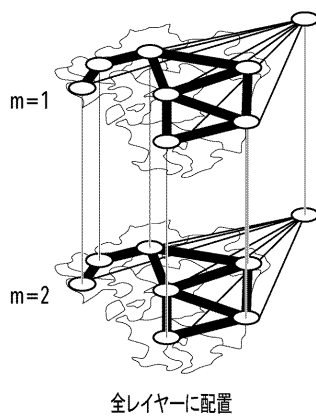
【図 7 A】



【図 7 B】



【図 7 C】



フロントページの続き

(72)発明者 稲垣 卓弘

東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 佐賀野 秀一

(56)参考文献 特表2016-528611 (JP, A)

国際公開第2012/118064 (WO, A1)

特開平9-146908 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G06E 1/00- 3/00

G02F 3/00