

(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
2022年1月27日(27.01.2022)



(10) 国際公開番号

WO 2022/018916 A1

(51) 国際特許分類:
G06N 3/04 (2006.01)

〒1138654 東京都文京区本郷七丁目3番1号
国立大学法人東京大学内 Tokyo (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2021/015878

(22) 国際出願日: 2021年4月19日(19.04.2021)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2020-124065 2020年7月20日(20.07.2020) JP

(71) 出願人: 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP). 国立大学法人東京大学 (THE UNIVERSITY OF TOKYO) [JP/JP]; 〒1138654 東京都文京区本郷七丁目3番1号 Tokyo (JP).

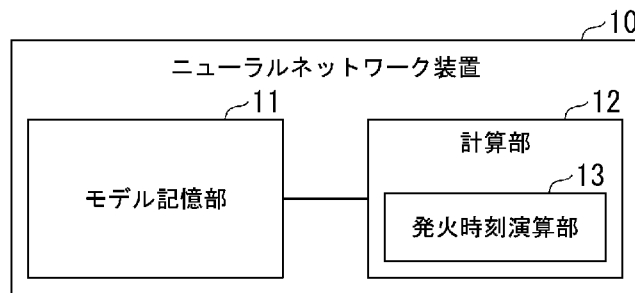
(74) 代理人: 棚井 澄雄, 外 (TANAI Sumio et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).

(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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, GH, GM, KE, LR, LS,

(54) Title: NEURAL NETWORK DEVICE, FIRING TIMING CALCULATION METHOD, AND RECORDING MEDIUM

(54) 発明の名称: ニューラルネットワーク装置、発火時刻演算方法および記録媒体



10 Neural network device
11 Model storage unit
12 Computation unit
13 Firing timing calculation unit

(57) Abstract: A neural network device according to the present invention narrows down, from among time segments from when a spike is received to when the next spike is received, candidates of time segments that include the firing timing of a spiking neuron, for which a membrane potential, during a period from when a spike is received to when the next spike is received, is represented by a monotonic function of time and firing conditions are represented by a comparison between the membrane potential and a threshold.

(57) 要約: ニューラルネットワーク装置が、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行う。

[続葉有]

MW, MZ, NA, RW, 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, 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)）

明 細 書

発明の名称：

ニューラルネットワーク装置、発火時刻演算方法および記録媒体

技術分野

[0001] 本発明は、ニューラルネットワーク装置、発火時刻演算方法および記録媒体に関する。

背景技術

[0002] (スパイキングニューラルネットワークについて)

ニューラルネットワークの一形態として、順伝搬型 (Feed-Forward) スパイキングニューラルネットワーク (Spiking Neural Network; SNN) およびリカレント (Recurrent、再帰型) スパイキングニューラルネットワークといったスパイキングニューラルネットワークがある。スパイキングニューラルネットワークとは、スパイキングニューロンモデルが結合しネットワークを形成したものである。スパイキングニューロンモデルを、スパイキングニューロン、または、単にニューロンとも称する。

[0003] スパイキングニューロンモデルは、生物学的神経細胞の細胞体部による多入力信号の統合およびスパイクの生成を模擬する。スパイクの生成を発火とも称する。スパイキングニューロンモデルの結合には前段後段の関係が有り、前段側のスパイキングニューロンモデルが発火すると後段側のスパイキングニューロンモデルへスパイクが伝達される。

[0004] (スパイキングニューロンモデルの説明)

スパイキングニューロンモデルは、膜電位を内部状態として持ち、膜電位が時間発展するモデルである。一般的なスパイキングニューロンモデルとして、漏れ積分発火ニューロンモデルが知られており、膜電位が式 (1) のような微分方程式に従って時間発展する。

[0005]

[数1]

$$\frac{d}{dt}v(t) = -\alpha_{leak}v(t) + I(t), \quad I(t) = \sum_j w_j r(t - t_j^{rec}) \quad \dots (1)$$

[0006] ここで、 v は、スパイキングニューロンにおける膜電位を示す。 α_{leak} は、漏れ積分発火モデルにおける漏れの大きさを示す定数の係数である。 I は、スパイキングニューロンにおけるシナプス後電流を示す。 w_j は、スパイキングニューロンへの結合の強さを示す係数であり、結合重み (Connection Weight) と呼ばれる。

[0007] t は時刻を示す。 t_j^{rec} は、式(1)で示されるスパイキングニューロンに対して前段のスパイキングニューロンのうち j 番目のスパイキングニューロンからのスパイクの到達時刻を示す。 $r(\cdot)$ は前段のスパイキングニューロンから伝達されたスパイクがシナプス後電流へ与える影響を示す関数である。

[0008] 膜電位が所定の閾値に達すると、スパイキングニューロンが発火する。

図11は、スパイキングニューロンの膜電位の時間発展と閾値との関係の例を示す図である。図11のグラフの横軸は時刻を示し、縦軸は、電位を示す。

線L1001は、膜電位を示す。 V_{th} は、膜電位の閾値を示す。 V_{reset} は、膜電位のリセット値を示す。 t_1^{rec} は、図11に示されるスパイキングニューロンに対して前段のスパイキングニューロンのうち1番目のスパイキングニューロンからのスパイクの到達時刻を示す。 t_2^{rec} は2番目のスパイキングニューロンからのスパイクの到達時刻を示す。 t_3^{rec} は3番目のスパイキングニューロンからのスパイクの到達時刻を示す。

[0009] 図11の例で、膜電位 v が閾値 V_{th} に達すると、スパイキングニューロンは発火する。すなわち、スパイキングニューロンはスパイクを生成する。その後、膜電位 v はリセット値 V_{reset} へと戻る。また、生成されたスパイクは、図11に示されるスパイキングニューロンに対して後段のスパイキングニ

ニューロンへと伝達される。

時刻 t^{rec}_1 におけるスパイク到達、および、時刻 t^{rec}_3 におけるスパイク到達では、何れも膜電位 v は閾値 V_{th} に達していない。一方、時刻 t^{rec}_2 におけるスパイク到達では、膜電位 v が閾値 V_{th} に達し、その後すぐに、リセット値である V_{reset} に低下している。

[0010] また、スパイキングニューロンモデルの発火に関連する技術が、特許文献 1 に記載されている。具体的には、特許文献 1 には、ニューロンの膜電位の閾値が小さい場合に、膜電位の閾値が小さいことによるニューロンの不安定を防止するために、ニューロンの膜電位の閾値を小さくする代わりに、ニューロンの各々に対応するシナプスの重みを増加させることが記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0011] 特許文献1：特開 2017-134821 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷が軽いことが好ましい。

[0013] 本発明は、上述の課題を解決することのできるニューラルネットワーク装置、発火時刻演算方法および記録媒体を提供することを目的としている。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明の第 1 の態様によれば、ニューラルネットワーク装置は、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行う発火時刻演算手段を備える。

[0015] 本発明の第 2 の態様によれば、発火時刻演算方法は、スパイクを受けてか

ら次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行うことを含む。

[0016] 本発明の第3の態様によれば、記録媒体は、コンピュータに、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行うことを実行させるためのプログラムを記憶する。

発明の効果

[0017] 本発明によれば、スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1]実施形態に係るニューラルネットワーク装置の概略構成の例を示す図である。

[図2]実施形態に係る対象モデルの概略構成の第1例を示す図である。

[図3]実施形態に係る対象モデルの概略構成の第2例を示す図である。

[図4]実施形態に係る対象モデルの概略構成の第3例を示す図である。

[図5]実施形態に係る対象モデルが備えるスパイキングニューロン100について説明するための図である。

[図6]実施形態に係るスパイキングニューロンについて、各時間区間内で単調変化する場合の膜電位の時間発展の例を示す図である。

[図7]実施形態に係るニューラルネットワーク装置が対象スパイキングニューロンの発火時刻を計算する処理手順の例を示すフローチャートである。

[図8]実施形態に係るニューラルネットワーク装置の構成例を示す図である。

[図9]実施形態に係る発火時刻演算方法における処理手順の例を示す図である。

。

[図10]少なくとも1つの実施形態に係る専用ハードウェアの構成例を示す概略ブロック図である。

[図11]スパイキングニューロンの膜電位の時間発展と閾値との関係の例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0019] 以下、本発明の実施形態を説明するが、以下の実施形態は請求の範囲に係る発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

[0020] (実施形態に係るニューラルネットワークシステムの構成について)

図1は、実施形態に係るニューラルネットワーク装置の概略構成の例を示す図である。図1に示す構成で、ニューラルネットワーク装置10は、モデル記憶部11と、計算部12とを備える。計算部12は、発火時刻演算部13を備える。

[0021] ニューラルネットワーク装置10は、スパイキングニューラルネットワークを用いて情報処理を行う。

ここでいうスパイキングニューラルネットワークは、スパイキングニューロン間でスパイクが伝達されるニューラルネットワークである。ここでいうスパイクは、そのスパイクを出力するスパイキングニューロンから入力を受けるスパイキングニューロンへ伝達され、入力を受けるスパイキングニューロンへの到達時刻の概念が存在する信号である。例えば、スパイクが、パルス信号として構成されていてもよいし、ステップ信号として構成されていてもよいが、これらに限定されない。

[0022] ここでいうスパイキングニューロンは、

(1) 時間発展する膜電位の概念が存在し、

(2) スパイキングニューロンの膜電位の時間発展が、そのスパイキングニューロンに入力されるスパイクの、そのスパイキングニューロンへの到達時刻と、そのスパイクが通る伝達経路に設定される重み係数とに依存し、

(3) 膜電位と閾値との比較によって、スパイキングニューロンの発火の有無（すなわち、スパイクの出力の有無）、および、発火有りの場合の発火時刻が定まる

ニューロンである。

[0023] ニューラルネットワーク装置 10 が行う処理は、スパイキングニューラルネットワークを用いて実行可能ないろいろな処理とすることができる。例えば、ニューラルネットワーク装置 10 が、画像認識、生体認証または数値予測を行うようにしてもよいが、これらに限定されない。

[0024] モデル記憶部 11 は、スパイキングニューラルネットワークモデルを記憶する。モデル記憶部 11 が記憶するスパイキングニューラルネットワークモデルは、いろいろな構造かついろいろな規模のものとすることができる。例えば、モデル記憶部 11 が記憶するスパイキングニューラルネットワークモデルが、順伝搬型スパイキングニューラルネットワークの形式に構成されていてもよいし、リカレントスパイキングニューラルネットワークの形式に構成されていてもよい。

スパイキングニューラルネットワークモデルを、単にニューラルネットワークモデルとも称する。モデル記憶部 11 が記憶するスパイキングニューラルネットワークモデルを対象モデルとも称する。

[0025] 図 2 は、対象モデルの概略構成の第 1 例を示す図である。図 2 は、対象モデルが順伝搬型スパイキングニューラルネットワークとして構成される場合の例を示している。

ここでいう順伝搬型は、ネットワークの形態の一つであり、層から層へ結合が存在し、その情報伝達が一方向のネットワークのことである。順伝搬型スパイキングニューラルネットワークの各層は 1 つ以上のスパイキングニューロンで構成されており、同層内のスパイキングニューロン間の結合は存在しない。

[0026] 図 2 の例で、対象モデルの例に該当するスパイキングニューラルネットワーク 110 は、複数のスパイキングニューロン 100 と、スパイキングニュー

ーロン間の結合とを含む。また、スパイキングニューロン１００は複数の層１１１を構成している。スパイキングニューラルネットワーク１１０は、入力を受け付け出力を返す。

[0027] 図３は、対象モデルの概略構成の第２例を示す図である。図３は、図２を参照して説明した順伝搬型スパイキングニューラルネットワークとして構成される場合の対象モデルの、さらに具体的な例を示している。具体的には、図３は、対象モデルが、順伝搬４層スパイキングニューラルネットワークとして構成され、各層が３つのスパイキングニューロンを有する場合の例を示している。

[0028] 図３の例で、対象モデルの例に該当するスパイキングニューラルネットワーク１１０は、４つの層１１１を含む。層１１１の各々は、３つのスパイキングニューロン１００を含む。４つの層１１１を区別する場合、前段側（データ入力側）から順に、層１１１－１、層１１１－２、層１１１－３、層１１１－４と称する。

[0029] また、隣接する２つの層１１１間で、前段側の層１１１のスパイキングニューロン１００の各々と後段側の層１１１のスパイキングニューロン１００の各々とが結合されている。前段側の層１１１のスパイキングニューロン１００の発火時に、結合される後段側の層１１１のスパイキングニューロン１００へ、結合重みを乗算されたスパイクが入力される。

図３では、スパイキングニューロン１００間の結合を、伝達経路１０１で示している。伝達経路１０１は、神経軸索とシナプスの模擬に相当する。

[0030] 順伝搬型の場合のスパイキングニューラルネットワーク１１０の最前段側の層１１１（図３の例では、層１１１－１）は入力層と呼ばれ、スパイキングニューラルネットワーク１１０の外部からの信号の入力を受け付ける。最後段側の層１１１（図３の例では層１１１－４）は出力層と呼ばれ、スパイキングニューラルネットワーク１１０の外部へ信号を出力する。入力層と出力層との間にある層（図３の例では、層１１１－２および１１１－３）は隠れ層もしくは中間層と呼ばれる。

[0031] ただし、対象モデルが順伝搬型スパイキングニューラルネットワークとして構成される場合の層数は、4層に限定されず2層以上であればよい。また、各層が備えるスパイキングニューロンの個数は特定の個数に限定されず、各層が1つ以上のスパイキングニューロンを備えていればよい。各層が同じ個数のスパイキングニューロンを備えていてもよいし、層によって異なる個数のスパイキングニューロンを備えていてもよい。また、隣り合う層における前段側の層111の全てのスパイキングニューロンと後段側の層111の全てのスパイキングニューロンとが結合されている必要は無い。

[0032] 図4は、対象モデルの概略構成の第3例を示す図である。図4は、対象モデルがリカレントスパイキングニューラルネットワークとして構成される場合の例を示している。

ここでいうリカレントは、ネットワークの形態の一つであり、再帰結合をもつネットワークのことである。リカレントスパイキングニューラルネットワークの構成は、あるスパイキングニューロンで発生したスパイクが、直接自分自身へ入力される場合、または、他のスパイキングニューロンを経由して、自分自身へスパイクが入力される場合を含む構成である。あるいは、1つのリカレントスパイキングニューラルネットワークが、あるスパイキングニューロンで発生したスパイクが、直接自分自身へ入力される場合と、他のスパイキングニューロンを介して、自分自身へスパイクが入力される場合との両方を含んでいてもよい。

[0033] 図4の例で、対象モデルの例に該当するスパイキングニューラルネットワーク110は、複数のスパイキングニューロン100と、スパイキングニューロン間の結合を含む。この結合は、どのスパイキングニューロンからどのスパイキングニューロンへも存在することが可能であり、さらに出力元のスパイキングニューロン自らへの結合も可能である。

[0034] 図3の場合と同様、図4でも、スパイキングニューロン100間の結合を、伝達経路101で示している。

ただし、リカレントスパイキングニューラルネットワークとして構成され

る場合の対象モデルが備えるスパイキングニューロンの個数は、特定の個数に限定されず、1つ以上であればよい。

[0035] 図5は、対象モデルが備えるスパイキングニューロン100について説明するための図である。

スパイキングニューロン100は、図5の伝達経路101で示される結合を介して、他の1個以上のスパイキングニューロン100からデータ（結合重みで重み付けされたスパイク）の入力を受ける。さらに、スパイキングニューロン100が、スパイキングニューロン100自らからもデータの入力を受けるようにしてもよい。

[0036] 入力ノードとして構成されるスパイキングニューロン100は、他の1個以上のスパイキングニューロン100またはスパイキングニューロン100自ら、またはこれらの両方からのデータの入力に加えて、あるいは代えて、対象モデルの外部からのデータ（入力データ）の入力を受け付ける。

[0037] また、スパイキングニューロン100は、図5の伝達経路101で示される結合を介して、他の1個以上のスパイキングニューロン100へデータ（スパイク）を出力する。さらに、スパイキングニューロン100が、スパイキングニューロン100自らへもデータを出力するようにしてもよい。スパイキングニューロン100が出力したスパイクは、結合重みを乗算されて、伝達先のスパイキングニューロン100に入力される。

[0038] 出力ノードとして構成されるスパイキングニューロン100は、他の1個以上のスパイキングニューロン100またはスパイキングニューロン100自ら、またはこれらの両方へのデータの出力に加えて、あるいは代えて、対象モデルの外部へデータ（出力データ）を出力する。

[0039] 結合された2つのスパイキングニューロン100のうち、スパイクを出力する側のスパイキングニューロン100を、前段側のスパイキングニューロン100とも称する。スパイクの入力を受ける側のスパイキングニューロン100を、後段側のスパイキングニューロン100とも称する。

[0040] 対象モデルにおいて、スパイキングニューロン100間の結合は、前段側

のスパイキングニューロン１００が出力するスパイクの電位に、結合毎に設定され学習可能な重み係数（結合重み）を乗算して、後段側のスパイキングニューロン１００に入力されるスパイクの電位を計算する式として示されていてもよい。

[0041] スパイキングニューロン１００（対象モデルに含まれるスパイキングニューロン）のうち１つ以上のスパイキングニューロン１００では、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間区間における膜電位が時刻の単調関数で示される。ここでいう時間区間は、ある時刻からある時刻までの時間である。

[0042] この、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間区間における膜電位が時刻の単調関数で示されるスパイキングニューロン１００のうち１つ以上が、発火時刻演算部１３による発火時刻の計算対象のスパイキングニューロン１００として扱われる。

対象モデルに含まれる全てのスパイキングニューロン１００で、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間区間における膜電位が、時刻の単調関数で示されていてもよい。また、発火時刻演算部１３が、対象モデルに含まれる全てのスパイキングニューロン１００の発火時刻を計算するようにしてもよい。

[0043] 計算部１２は、対象モデルの演算を行うことで、情報処理を行う。具体的には、計算部１２は、対象モデルに含まれるスパイキングニューロンの発火時刻を、発火時刻演算部１３にて算出する。計算部１２は、算出された発火時刻を、そのスパイキングニューロンに対する後段のスパイキングニューロンへのスパイクの到達時刻として扱い、後段のスパイキングニューロンの発火時刻の算出に反映させる。また、計算部１２は、対象モデルの出力層の発火時刻の計算結果を、対象モデルの出力として出力する。

[0044] なお、接続されている２つのスパイキングニューロンのうち前段側のスパイキングニューロンで生成されたスパイクが、直ちに後段側のスパイキングニューロンに伝達されるものとする。これにより、前段側のスパイキングニ

ューロンの発火時刻を、後段側のスパイキングニューロンへのスパイクの到達時刻としても用いることができるものとする。

あるいは、この条件が成立しない対象モデルの場合は、計算部 12 が、スパイクの伝達に要する時間を計算するようにしてもよい。

[0045] 計算部 12 が、さらに、対象モデルの学習を行うようにしてもよい。すなわち、計算部 12 が、対象モデルに含まれるスパイキングニューロン間の結合重みなどのモデルパラメータ値を調整するようにしてもよい。

[0046] 発火時刻演算部 13 は、対象モデルに含まれるスパイキングニューロンの発火時刻を計算する。発火時刻演算部 13 は、発火時刻演算手段の例に該当する。

発火時刻演算部 13 による発火時刻の計算結果が、発火無しとなってもよい。発火無しとの計算結果は、発火時刻計算対象のスパイキングニューロンが、発火時刻計算対象の期間内には発火しないことを示す。

[0047] (実施形態に係るニューラルネットワーク装置の発火時刻演算手法について)

発火時刻演算部 13 によるスパイキングニューロンの発火時刻の計算についてさらに説明する。発火時刻演算部 13 が発火時刻を計算するスパイキングニューロンのうちの 1 つを対象スパイキングニューロンと称する。対象スパイキングニューロンと結合され、対象スパイキングニューロンへスパイクを出力するスパイキングニューロンを、前段スパイキングニューロンと称する。対象スパイキングニューロンと結合され、対象スパイキングニューロンからのスパイクの入力を受けるスパイキングニューロンを、後段スパイキングニューロンと称する。

上述したように、対象スパイキングニューロンに対し、スパイクを受けた時刻から次にスパイクを受ける時刻までの時間区間における膜電位が単調関数で示されるという条件を課す。

[0048] ここでの単調関数は、広義の単調増加関数、狭義の単調増加関数、広義の単調減少関数、または、狭義の単調減少関数の何れであってもよい。対象ス

スパイクニューロンがスパイクを受けた時刻から次にスパイクを受ける時刻までの時間区間によって、上述した4種類の単調関数のうち異なる種類の単調関数で膜電位が示されていてもよい。例えば、ある時間区間では膜電位が単調増加し、別のある時間区間では膜電位が単調減少していてもよい。

[0049] スパイクニューロンがスパイクを受けた時刻から次にスパイクを受ける時刻までの時間区間における膜電位が単調関数で示される、という条件を満たす対象スパイクニューロンの例の1つは、式(2)によって示される。

[0050] [数2]

$$\frac{d}{dt}v(t) = \sum_{j=1}^N w_j \theta(t - t_j^{\text{rec}}) \quad \dots (2)$$

[0051] Nは対象スパイクニューロンへの結合の個数である。 w_j はj番目の結合に関する結合重みである。 t_j^{rec} はj番目の結合によって入力されるスパイクの到達時刻である。

ここでは各結合において最大一度のスパイクの入力しかない場合を考える。 t_j^{rec} の「j」は、結合を識別する識別情報である。また、1つの結合から最大一度のスパイクがスパイクニューロンに入力されることから、 t_j^{rec} の「j」は、スパイクを識別する識別情報としても機能する。スパイクを識別する識別情報としての「j」を、スパイクのインデックスとも称する。

1つの結合から複数のスパイクの入力がある場合も、スパイク毎にインデックスを紐付けて、同様に考えることができる。

θ はステップ関数であり、式(3)のように示される。

[0052] [数3]

$$\theta(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad \dots (3)$$

[0053] 式(2)の解析解は、式(4)のように示される。

[0054]

[数4]

$$v(t) = \sum_{j=1}^N w_j(t - t_j^{\text{rec}})\theta(t - t_j^{\text{rec}}) \quad \dots (4)$$

[0055] ここで、表記を簡単にするために、スパイクのインデックスを発火時時刻が早い順に並べなおして表現する。つまり式（5）を満たすようなインデックス1、2、 $\dots$ 、Nを用いる。

[0056] [数5]

$$t_1^{\text{rec}} \leq t_2^{\text{rec}} \leq \dots \leq t_N^{\text{rec}} \quad \dots (5)$$

[0057] なお、並べなおされたインデックスと元のインデックスとは一対一に対応付けられるので、並べなおされたインデックス表示から元のインデックス表示に戻すことは容易に行える。この並べなおされたインデックス表示の下で、2つの時刻 t_1 、 t_2 を、式（6）を満たす任意の時刻とする。

[0058] [数6]

$$t_k^{\text{rec}} \leq t_1 \leq t_2 \leq t_{k+1}^{\text{rec}}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad \dots (6)$$

[0059] この場合、膜電位 v が広義の単調増加関数で示されるという条件は、式（7）のように示される。

[0060] [数7]

$$v(t_1) \leq v(t_2) \quad \dots (7)$$

[0061] 狭義の単調増加の場合は、式（6）の「 $t_1 \leq t_2$ 」を「 $t_1 < t_2$ 」で置き換え、式（7）の「 $v(t_1) \leq v(t_2)$ 」を「 $v(t_1) < v(t_2)$ 」で置き換える。

膜電位 v が広義の単調減少関数で示されるという条件は、式（8）のように示される。

[0062] [数8]

$$v(t_1) \geq v(t_2) \quad \dots (8)$$

[0063] 狭義の単調減少の場合は、式（６）の「 $t_1 \leq t_2$ 」を「 $t_1 < t_2$ 」で置き換え、式（８）の「 $v(t_1) \geq v(t_2)$ 」を「 $v(t_1) > v(t_2)$ 」で置き換える。

[0064] 対象スパイクニューロンが k 番目のスパイクを受けたときの膜電位 v は、式（４）の t に t^{rec}_k を代入して式（９）のように表すことができる。

[0065] [数9]

$$v[k] = v(t_k^{\text{rec}}) = \sum_{j=1}^{k-1} w_j(t_k^{\text{rec}} - t_j^{\text{rec}}), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \dots (9)$$

[0066] 式（９）に示すように、 $v(t^{\text{rec}}_k)$ 、すなわち、 k 番目のスパイクの到達時刻 t^{rec}_k における膜電位 v を、 $v[k]$ とも表記する。

さらにここで、 ws を式（１０）のように定義する。

[0067] [数10]

$$ws[k] := \sum_{j=1}^k w_j, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \dots (10)$$

[0068] 「 $:=$ 」は、定義式であることを示す。

また、 wt_s を式（１１）のように定義する。

[0069] [数11]

$$wt_s[k] := \sum_{j=1}^k w_j t_j^{\text{rec}}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \dots (11)$$

[0070] 式（１２）のように、 $ws[k]$ を用いて $ws[k+1]$ を効率的に計算できる。

[0071] [数12]

$$ws[k+1] = ws[k] + w_{k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad \dots (12)$$

[0072] 式（１３）のように、 $wt_s[k]$ を用いて $wt_s[k+1]$ を効率的に計算できる。

[0073] [数13]

$$wts[k+1] = wts[k] + w_{k+1}t_{k+1}^{rec}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad \dots (13)$$

[0074] 式(9)、(10)および(11)より、膜電位 $v[k]$ は ws および wts を用いて式(14)のように表される。

[0075] [数14]

$$v[k] = t_k^{rec} \cdot ws[k-1] - wts[k-1], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \dots (14)$$

[0076] ここで、膜電位 v は、 $1 \leq k \leq N-1$ を満たす任意の整数 k について、時刻 t^{rec}_k から時刻 t^{rec}_{k+1} までの間の時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ で単調なので、スパイキングニューロンがこの時間区間内に発火する必要十分条件は、式(15)のように表すことができる。

[0077] [数15]

$$v[k] \leq V_{th} \leq v[k+1] \quad \dots (15)$$

[0078] スパイキングニューロンは、膜電位 v が閾値よりも小さい状態から閾値に達したときに発火するので、式(15)に示されるように、膜電位 v が単調増加する時間区間で発火する。

[0079] 図6は、各時間区間内で単調である場合の膜電位の時間発展の例を示す図である。図6のグラフの横軸は時刻を示し、縦軸は電位を示す。

V_{th} は、膜電位の閾値を示す。線 $L1$ は、膜電位を示す。

時刻 t^{rec}_{k-1} は、前段スパイキングニューロンからのスパイク到達時刻のうち $k-1$ 番目の到達時刻を示す。膜電位 $v[k-1]$ は、 $k-1$ 番目の到達時刻における対象スパイキングニューロンの膜電位を示す。

[0080] 時刻 t^{rec}_k は、前段スパイキングニューロンからのスパイク到達時刻のうち k 番目の到達時刻を示す。膜電位 $v[k]$ は、 k 番目の到達時刻における対象スパイキングニューロンの膜電位を示す。

時刻 t^{rec}_{k+1} は、前段スパイキングニューロンからのスパイク到達時刻のうち $k+1$ 番目の到達時刻を示す。膜電位 $v[k+1]$ は、 $k+1$ 番目の到

達時刻における対象スパイキングニューロンの膜電位を示す。

[0081] 図6の例で、時刻 t^{rec}_1 から t^{rec}_k までの各時刻における膜電位 $v[1]$ から $v[k]$ までは、何れも閾値 V_{th} よりも低い（小さい）。一方、時刻 t^{rec}_{k+1} における膜電位 $v[k+1]$ は、閾値 V_{th} よりも高い（大きい）。中間値の定理より、時刻 t^{rec}_k から t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ 内に、膜電位が閾値 V_{th} と等しくなる時刻、すなわち、対象スパイキングニューロンの発火時刻 t^{fir} が存在する。

[0082] 発火時刻演算部13が、前段スパイキングニューロンからのスパイクの到達時刻 t^{rec}_1 、 t^{rec}_2 、 $\dots$ の順に、膜電位 $v[1]$ 、 $v[2]$ 、 $\dots$ と閾値 V_{th} とを比較し、膜電位 v が閾値 V_{th} よりも高くなる最初の到達時刻 t^{rec}_{k+1} を特定するようにしてもよい。これにより、発火時刻演算部13は、対象スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間を、前段スパイクニューロンの k 番目の到達時刻 t^{rec}_k から、 $k+1$ 番目の到達時刻 t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ に特定することができる。

[0083] 図6は、膜電位 v が閾値 V_{th} に達したときに膜電位 v のリセットを行わない場合の例を示している。1つのスパイキングニューロンが最大で1回のみ発火するという条件が設けられている場合は、2回目以降の発火の有無を判定する必要がなく、したがって、膜電位 v をリセットする必要もない。

一方、1つのスパイキングニューロンが2回以上発火し得る場合は、発火時刻演算部13が、膜電位 v が閾値 V_{th} に達していると判定した時刻の膜電位 v から、閾値 V_{th} に相当する電位を減算するようにしてもよい。

[0084] 図6の例の場合、発火時刻演算部13は、時刻 t^{rec}_{k+1} における膜電位 $v[k+1]$ が閾値 V_{th} に達している ($v[k+1] \geq V_{th}$) と判定する。そこで、発火時刻演算部13が、時刻 t^{rec}_{k+1} における膜電位 $v[k+1]$ から閾値 V_{th} を減算する ($v[k+1] := v[k+1] - V_{th}$) ようにしてもよい。そして、発火時刻演算部13が、閾値 V_{th} を減算した後の $v[k+1]$ に基づいて $v[k+2]$ 、 $v[k+3]$ 、 $\dots$ を算出するようにしてもよい。

[0085] あるいは、 m を1、2、・・・として、 mV_{th} の閾値を設定しておくようにしてもよい。そして、発火時刻演算部13が、膜電位 v が mV_{th} の閾値に到達した場合、対象スパイキングニューロンが m 回目の発火を行うものとして扱うようにしてもよい。

[0086] 時刻 t^{rec}_k から時刻 t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ における膜電位が時刻の1次関数で示される場合、式(15)を満たす k が見つければ、対象スパイキングニューロンの発火時刻 t^{fir} について、式(4)を用いて式(16)が得られる。

[0087] [数16]

$$V_{th} = \sum_{j=1}^k w_j (t^{fir} - t_j^{rec}) \quad \dots (16)$$

[0088] 式(16)を解くと、対象スパイキングニューロンの発火時刻 t^{fir} は式(17)で計算することができる。

[0089] [数17]

$$t^{fir} = \frac{V_{th} + wts[k]}{ws[k]} \quad \dots (17)$$

[0090] (実施形態に係るニューラルネットワーク装置の発火時刻演算の省略手法について)

発火時刻 t^{fir} を含む時間区間を特定するための式(15)を満たす k を効率的に計算する手法を説明する。式(12)から式(14)までに基づくと、膜電位が式(18)を満たすことがわかる。

[0091]

[数18]

$$\begin{aligned}
 v[k+1] - v[k] &= t_{k+1}^{\text{rec}} \cdot ws[k] - t_k^{\text{rec}} \cdot ws[k-1] - (wts[k] - wts[k-1]) \\
 &= t_{k+1}^{\text{rec}} \cdot ws[k] - t_k^{\text{rec}} \cdot ws[k-1] - w_k t_k^{\text{rec}} \\
 &= t_{k+1}^{\text{rec}} \cdot ws[k] - t_k^{\text{rec}} (ws[k-1] + w_k) \\
 &= t_{k+1}^{\text{rec}} \cdot ws[k] - t_k^{\text{rec}} ws[k] \\
 &= (t_{k+1}^{\text{rec}} - t_k^{\text{rec}}) ws[k]
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

[0092] ここで、 $0 \leq t_{k+1}^{\text{rec}} - t_k^{\text{rec}}$ であるため、 $ws[k] \leq 0$ であれば $v[k+1] \leq v[k]$ となり、発火の条件式である式(15)を満たさないことがわかる。そこで、発火時刻演算部13が $ws[k]$ の符号を判定し、 $ws[k] \leq 0$ と判定した場合は、その k について式(15)を満たすか否かの判定を省略するようにしてもよい。この場合、発火時刻演算部13は、式(14)による $v[k+1]$ の計算を省略することができる。

[0093] (実施形態に係るニューラルネットワークの動作)

図7は、ニューラルネットワーク装置10が対象スパイキングニューロンの発火時刻を計算する処理手順の例を示すフローチャートである。

(ステップS101)

発火時刻演算部13は、スパイクの到着時刻のインデックス k の値を1に設定する。代入を「←」で示している。

[0094] (ステップS102)

発火時刻演算部13は、 $ws[k]$ の値、および $wts[k]$ の値を計算する。

ニューラルネットワーク装置10が複数のスパイキングニューロンの計算を並列実行しており、対象スパイキングニューロンに k 番目のスパイクがまだ到達していない場合は、発火時刻演算部13は、 k 番目のスパイクの到達を待ってステップS102の処理を行うことができる。

$k \geq 2$ の場合、すなわち、ステップS102の処理の2回目以降の実行で

は、上記の式（１２）および式（１３）に示されるように、発火時刻演算部１３は、前回のステップＳ１０２の処理における計算結果を用いて効率的に計算を行うことができる。

[0095] （ステップＳ１０３）

発火時刻演算部１３は、ステップＳ１０２で計算した $w_s[k]$ の値が０より大きいかなんかを判定する。上述したように、 $w_s[k] \leq 0$ の場合は、式（１５）を満たすかなんかの判定を省略できるからである。

$w_s[k] > 0$ であると判定した場合（ステップＳ１０３：ＹＥＳ）、処理がステップＳ１１１へ進む。

$w_s[k] \leq 0$ であると判定した場合（ステップＳ１０３：ＮＯ）、処理がステップＳ１６１へ進む。

[0096] （ステップＳ１１１）

発火時刻演算部１３は、 $k = N$ かなんかを判定する。すなわち、発火時刻演算部１３は、予め定められている個数のスパイクが全て対象スパイクニューロンに到達したかなんかを判定する。

N が前段スパイクニューロンとの結合の個数であり、かつ、前段スパイクニューロンのうち発火しないことが確定したスパイクニューロンがある場合、発火時刻演算部１３が、前段スパイクニューロンの何れかが発火しないことが確定する毎に、 N の値を１ずつ小さくする（ $N := N - 1$ ）ようにしてもよい。

$k \neq N$ と発火時刻演算部１３が判定した場合（ステップＳ１１１：ＮＯ）、処理がステップＳ１２１へ進む。

$k = N$ と発火時刻演算部１３が判定した場合（ステップＳ１１１：ＹＥＳ）、処理がステップＳ１３１へ進む。

[0097] （ステップＳ１２１）

発火時刻演算部１３は、 $v[k+1]$ を計算する。

上記の式（１４）に示されるように、発火時刻演算部１３は、 $w_s[k]$ および $w_{ts}[k]$ を用いて効率的に $v[k+1]$ を計算することができる。

。

ニューラルネットワーク装置 10 が複数のスパイキングニューロンの計算を並列実行しており、対象スパイキングニューロンに $k+1$ 番目のスパイクが未だ到達していない場合は、発火時刻演算部 13 は、 $k+1$ 番目のスパイクの到達を待ってステップ S 121 の処理を行うことができる。

[0098] (ステップ S 122)

発火時刻演算部 13 は、時刻 t^{rec}_k から t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ の間に対象スパイキングニューロンが発火するか否かを判定する。具体的には、発火時刻演算部 13 は、上記の式 (15) に示される $v[k] \leq V_{th} \leq v[k+1]$ が成立するか否かを判定する。

[0099] 発火時刻演算部 13 がステップ S 122 の処理を行う場合、対象スパイキングニューロンは時刻 t^{rec}_k までには発火していないので、 $v[k] \leq V_{th}$ が成立していることになる。したがって、発火時刻演算部 13 は、式 (15) のうち右側の不等式が成立するか否かの判定、すなわち、 $V_{th} \leq v[k+1]$ が成立するか否かの判定のみを行えばよい。

$v[k] \leq V_{th} \leq v[k+1]$ が成立すると判定した場合 (ステップ S 122: YES)、処理がステップ S 131 へ進む。

$v[k] \leq V_{th} \leq v[k+1]$ が成立していないと判定した場合 (ステップ S 122: NO)、処理がステップ S 141 へ進む。

[0100] (ステップ S 131)

発火時刻演算部 13 は、時刻 t^{rec}_k から t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ の範囲内で、対象スパイキングニューロンの発火時刻を計算し出力する。

ステップ S 122: YES にて処理がステップ S 131 に遷移する場合、図 6 を参照して説明したのと同様、中間値の定理より、時刻 t^{rec}_k から t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ 内に対象スパイキングニューロンの発火時刻 t^{fir} が存在する。

t^{rec}_k から t^{rec}_{k+1} までの時間区間 $[t^{rec}_k, t^{rec}_{k+1}]$ において対象

スパイクニューロンの膜電位が時刻の一次関数で示される場合は、発火時刻演算部 13 は、上述した式 (17) を用いて発火時刻を計算することができる。

[0101] ステップ S 111 : YES にて処理がステップ S 131 に遷移する場合、ステップ S 103 : YES により、 $w_s[N] > 0$ が成立している。したがって、時刻 t_{rec_N} 以降は、対象スパイクニューロンの膜電位は単調増加である。また、時刻 t_{rec_N} までには対象スパイクニューロンは発火しておらず、 $v[N] < V_{th}$ が成立する。これらにより、時刻 t_{rec_N} 以降のある時刻において、対象スパイクニューロンの膜電位 $v[N]$ が閾値 V_{th} に到達する。すなわち、時刻 t_{rec_N} 以降に、対象スパイクニューロンの発火時刻 t_{fir} が必ず存在する。

[0102] 時刻 t_{rec_N} 以降における対象スパイクニューロンの膜電位が時刻の一次関数で示される場合、発火時刻演算部 13 は、上述した式 (17) を用いて発火時刻 t_{fir} を計算することができる。

例えば、発火時刻演算部 13 は、時刻 t_{rec_N} における膜電位と閾値との差 $V_{th} - v[N]$ を算出する。そして、発火時刻演算部 13 は、算出した差 $V_{th} - v[N]$ を、時刻 t_{rec_N} 以降における単位時間当たりの膜電位の増加量 $dv(t)/dt$ で除算して、膜電位が差 $V_{th} - v[N]$ だけ増加するのに要する時間 t_{diff} を算出する。そして、発火時刻演算部 13 は、算出した時間 t_{diff} を時刻 t_{rec_N} に加算して、 $t_{fir} = t_{rec_N} + t_{diff}$ と算出する。

ステップ S 131 の後、ニューラルネットワーク装置 10 は、図 7 の処理を終了する。

[0103] (ステップ S 141)

発火時刻演算部 13 は、インデックス k の値を 1 だけ増加させる。

ステップ S 141 の後、処理がステップ S 102 へ戻る。

[0104] (ステップ S 151)

発火時刻演算部 13 は、対象スパイクニューロンが発火しないと算出する。したがって、発火時刻演算部 13 は、対象スパイクニューロンの

発火時刻の計算結果として、発火無しとの情報を出力する。

処理がステップS 1 5 1に遷移する場合、ステップS 1 0 3 : N Oにより、 $w_s [N] \leq 0$ が成立している。したがって、時刻 t^{rec}_N 以降は、対象スパikingニューロンの膜電位は単調減少（少なくとも広義の単調減少）である。また、時刻 t^{rec}_N までには対象スパikingニューロンは発火しておらず、 $v [N] < V_{th}$ が成立する。これらにより、時刻 t^{rec}_N 以降も対象スパikingニューロンの膜電位 $v [N]$ が閾値 V_{th} に到達することはない、対象スパikingニューロンは発火しない。

ステップS 1 5 1の後、ニューラルネットワーク装置10は、図7の処理を終了する。

[0105] (ステップS 1 6 1)

発火時刻演算部13は、 $k = N$ か否かを判定する。

$k = N$ と発火時刻演算部13が判定した場合（ステップS 1 6 1 : Y E S）、処理がステップS 1 5 1へ遷移する。

$k \neq N$ と発火時刻演算部13が判定した場合（ステップS 1 6 1 : N O）、処理がステップS 1 4 1へ遷移する。

[0106] (実施形態に係る効果)

以上のように、スパikingニューロンは、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が膜電位と閾値との比較で示される。発火時刻演算部13は、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、対象スパikingニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行う。

ニューラルネットワーク装置10によれば、発火時刻の計算対象の時間区間を絞り込むことができ、この点で、対象スパikingニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

例えば、ニューラルネットワーク装置10が、発火時刻の計算対象の時間区間を1つの時間区間に絞り込んだ場合、その時間区間内における発火時間を求める処理を1回のみ行えばよい。さらに例えば、発火時間を求める処理

に除算が含まれる場合、その除算を行う回数が１回で済む。ニューラルネットワーク装置１０の処理をハードウェア的な計算で行う場合、除算回路を小さくすることができ回路面積が比較的小さくて済む。

[0107] また、発火時刻演算部１３は、スパイキングニューロンがスパイクを受ける時刻毎の膜電位と閾値との比較に基づいて、時間区間のうち対象スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間を特定する。

ニューラルネットワーク装置１０によれば、時間区間の候補の絞り込みの段階では、スパイキングニューロンがスパイクを受ける時刻毎の膜電位を計算すればよい。したがって、発火時刻が含まれる候補から除外された時間区間については、スパイキングニューロンがスパイクを受けた後、次のスパイクを受ける前までの時間における膜電位を計算する必要がある。ニューラルネットワーク装置１０によれば、この点で、対象スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

[0108] また、発火時刻演算部１３は、スパイキングニューロンがスパイクを受ける時刻毎の膜電位を、そのスパイキングニューロンが膜電位計算対象のスパイクを受けるまでに受けた全てのスパイクに対する重み係数（結合重み）に関する級数を用いて算出する。

ニューラルネットワーク装置１０では、重み係数に関する級数の値を求める際に、前回スパイキングニューロンがスパイクを受けたときに算出した級数の値を用いることができる。ニューラルネットワーク装置１０によれば、この点で、対象スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

[0109] また、発火時刻演算部１３は、スパイキングニューロンが、あるスパイクを受けるまでに受けた全てのスパイクに対する重み係数（結合重み）の合計が正か否かに基づいて、発火時刻が含まれない時間区間を特定する。

ニューラルネットワーク装置１０では、重み係数の合計を算出する簡単な計算、および、算出した合計が正か否かを判定するという簡単な処理で、発火時刻が含まれない時間区間を特定し、発火時刻が含まれる時間区間の候補か

ら除外することができる。ニューラルネットワーク装置 10 によれば、この点で、対象スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

さらに、ニューラルネットワーク装置 10 では、重み係数の合計を算出する際に、前回スパイキングニューロンがスパイクを受けたときに算出した重み係数の合計を用いることができる。ニューラルネットワーク装置 10 によれば、この点でさらに、対象スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を軽くすることができる。

[0110] また、スパイキングニューロンがスパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位を示す時刻の単調関数は、時刻の一次関数である。発火時刻演算部 13 は、閾値 V_{th} と、対象スパイキングニューロンの発火時刻 t_{fir} が含まれると判定された時間区間の開始時刻 t_{rec_k} までに受ける全てのスパイクに対する重み係数の合計 $w_s[k]$ と、その開始時刻 t_{rec_k} までに受ける各スパイクについての、そのスパイクに対する重み係数とそのスパイクの到達時刻との積の合計 $w_{ts}[k]$ とに基づいて、発火時刻を算出する。

ニューラルネットワーク装置 10 では、これらの値を用いた簡単な計算で、発火時刻を算出することができる。さらには上記のように、 $w_s[k]$ の値、および、 $w_{ts}[k]$ の値は、級数として簡単に計算することができる。ニューラルネットワーク装置 10 によれば、この点で、対象スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

[0111] 図 8 は、実施形態に係るニューラルネットワーク装置の構成例を示す図である。図 8 に示す構成で、ニューラルネットワーク装置 200 は、発火時刻演算部 201 を備える。かかる構成で、発火時刻演算部 201 は、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補

の絞り込みを行う。

発火時刻演算部 201 は、発火時刻演算手段の例に該当する。

[0112] ニューラルネットワーク装置 200 によれば、発火時刻の計算対象の時間区間を絞り込むことができ、この点で、スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

例えば、ニューラルネットワーク装置 200 が、発火時刻の計算対象の時間区間を 1 つの時間区間に絞り込んだ場合、その時間区間内における発火時間を求める処理を 1 回のみ行えばよい。さらに例えば、発火時間を求める処理に除算が含まれる場合、その除算を行う回数が 1 回で済む。ニューラルネットワーク装置 200 の処理をハードウェア的な計算で行う場合、除算回路を小さくすることができ回路面積が比較的小さくて済む。

[0113] 図 9 は、実施形態に係る発火時刻演算方法における処理手順の例を示す図である。

図 9 に示す発火時刻演算方法は、発火時刻の演算を行う工程（ステップ S 201）を含む。

発火時刻の演算を行う工程（ステップ S 201）では、スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行う。

[0114] 図 9 に示す発火時刻演算方法では、発火時刻の計算対象の時間区間を絞り込むことができ、この点で、スパイキングニューロンの発火時刻の計算負荷を比較的軽くすることができる。

例えば、図 9 に示す発火時刻演算方法で、発火時刻の計算対象の時間区間を 1 つの時間区間に絞り込んだ場合、その時間区間内における発火時間を求める処理を 1 回のみ行えばよい。

[0115] ニューラルネットワーク装置 10 およびニューラルネットワーク装置 20

0の全部または一部が専用ハードウェアに実装されていてもよい。

図10は、少なくとも1つの実施形態に係る専用ハードウェアの構成例を示す概略ブロック図である。図10に示す構成で、専用ハードウェア500は、CPU510と、主記憶装置520と、補助記憶装置530と、インタフェース540とを備える。

[0116] ニューラルネットワーク装置10が専用ハードウェア500に実装される場合、計算部12およびその各部の動作は、プログラムの形式で補助記憶装置530に記憶されている。CPU510は、プログラムを補助記憶装置530から読み出して主記憶装置520に展開し、当該プログラムに従って上記処理を実行する。

また、CPU510は、プログラムに従って、モデル記憶部11に対応する記憶領域を主記憶装置520に確保する。

ニューラルネットワーク装置10が他の装置と通信を行う場合、インタフェース540が通信機能を有し、CPU510の制御に従って通信を行うことで実行される。

[0117] ニューラルネットワーク装置200が専用ハードウェア500に実装される場合、発火時刻演算部201の動作は、プログラムの形式で補助記憶装置530に記憶されている。CPU510は、プログラムを補助記憶装置530から読み出して主記憶装置520に展開し、当該プログラムに従って上記処理を実行する。

[0118] 専用ハードウェア500に加えて、あるいは代えて、パソコン(Personal Computer; PC)またはGraphical Processing Unit(GPU)等の汎用ハードウェアを用いるようにしてもよく、この場合の処理も、上述した専用ハードウェア500の場合の処理と同様である。

[0119] なお、ニューラルネットワーク装置10、および、ニューラルネットワーク装置200が行う処理の全部または一部を実行するためのプログラムをコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録して、この記録媒体に記録されたプログラムをコンピュータシステムに読み込ませ、実行することにより各部

の処理を行ってもよい。なお、ここでいう「コンピュータシステム」とは、OSや周辺機器等のハードウェアを含むものとする。

また、「コンピュータ読み取り可能な記録媒体」とは、フレキシブルディスク、光磁気ディスク、ROM (Read Only Memory)、CD-ROM (Compact Disc Read Only Memory) 等の可搬媒体、コンピュータシステムに内蔵されるハードディスク等の記憶装置のことをいう。また上記プログラムは、前述した機能の一部を実現するためのものであっても良く、さらに前述した機能をコンピュータシステムにすでに記録されているプログラムとの組み合わせで実現できるものであっても良い。

[0120] 以上、この発明の実施形態について図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない範囲の設計等も含まれる。

符号の説明

[0121] 10、200 ニューラルネットワーク装置
11 モデル記憶部
12 計算部
13、201 発火時刻演算部

[0122] この出願は、2020年7月20日に出願された日本国特願2020-124065を基礎とする優先権を主張し、その開示の全てをここに取り込む。

産業上の利用可能性

[0123] 本発明は、ニューラルネットワーク装置、発火時刻演算方法および記録媒体に適用してもよい。

請求の範囲

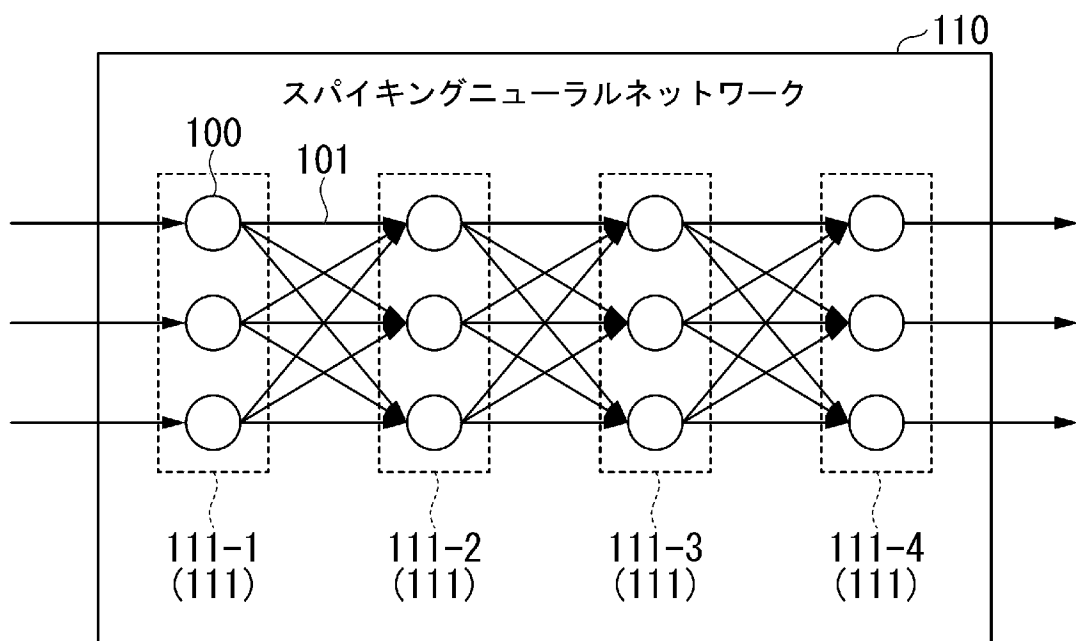
- [請求項1] スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行う発火時刻演算手段
- を備えるニューラルネットワーク装置。
- [請求項2] 前記発火時刻演算手段は、前記スパイキングニューロンがスパイクを受ける時刻毎の前記膜電位と前記閾値との比較に基づいて、前記時間区間のうち前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間を特定する、
- 請求項1に記載のニューラルネットワーク装置。
- [請求項3] 前記発火時刻演算手段は、前記スパイキングニューロンがスパイクを受ける時刻毎の前記膜電位を、そのスパイキングニューロンが膜電位計算対象のスパイクを受けるまでに受ける全てのスパイクに対する重み係数に関する級数を用いて算出する、
- 請求項2に記載のニューラルネットワーク装置。
- [請求項4] 前記発火時刻演算手段は、前記スパイキングニューロンが、あるスパイクを受けるまでに受ける全てのスパイクに対する重み係数の合計が正か否かに基づいて、前記発火時刻が含まれない時間区間を特定する、
- 請求項1から3の何れか一項に記載のニューラルネットワーク装置。
- [請求項5] 前記単調関数は時刻の一次関数であり、
- 前記発火時刻演算手段は、前記閾値と、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれると判定された時間区間の開始時刻までに受ける全てのスパイクに対する重み係数の合計と、前記開始時刻までに受

ける各スパイクについての、そのスパイクに対する重み係数とそのスパイクの到達時刻との積の合計とに基づいて、前記発火時刻を算出する、

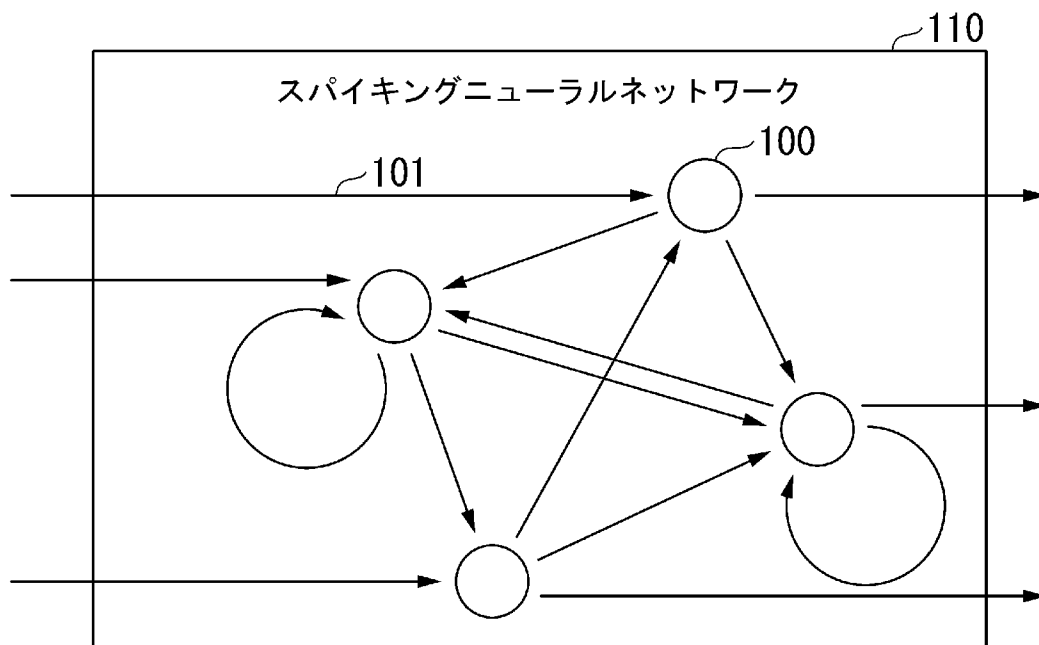
請求項 1 から 4 の何れか一項に記載のニューラルネットワーク装置。

[請求項6] スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行うことを含む発火時刻演算方法。

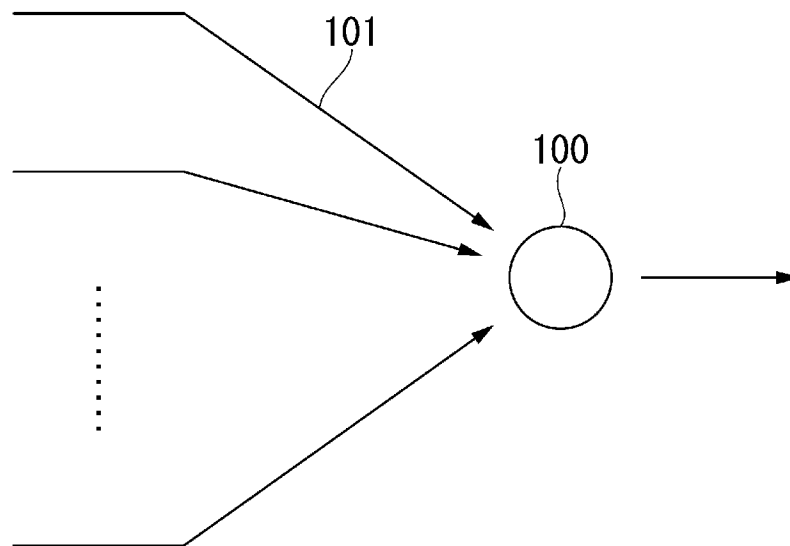
[請求項7] コンピュータに、
スパイクを受けてから次のスパイクを受けるまでの時間における膜電位が時刻の単調関数で示され、発火条件が前記膜電位と閾値との比較で示されるスパイキングニューロンが、スパイクを受けてから次にスパイクを受けるまでの各時間区間のうち、前記スパイキングニューロンの発火時刻が含まれる時間区間の候補の絞り込みを行うことを実行させるためのプログラムを記憶する記録媒体。



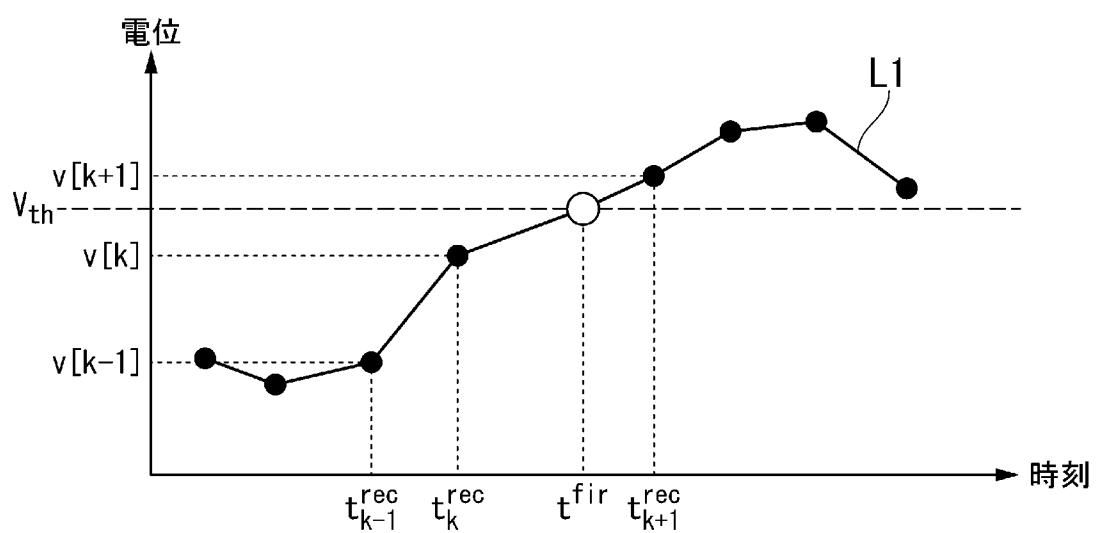
[図4]



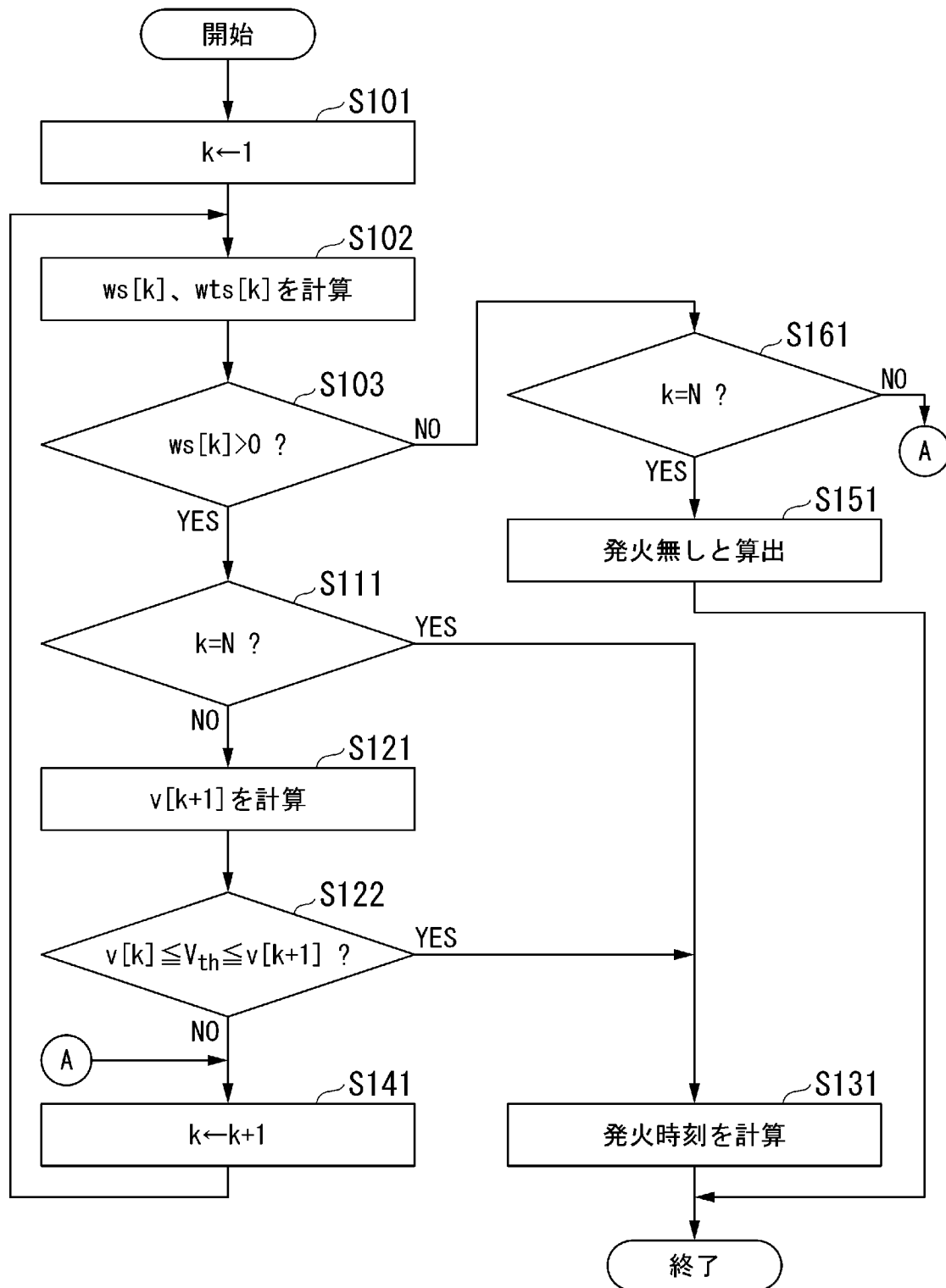
[図5]



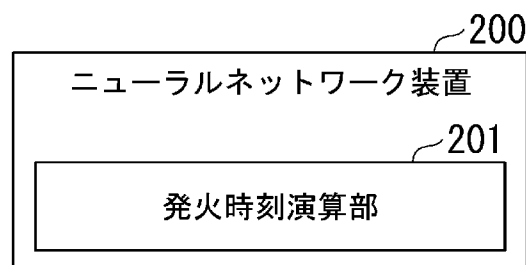
[図6]



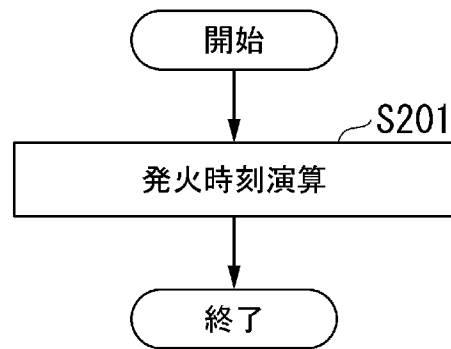
[図7]



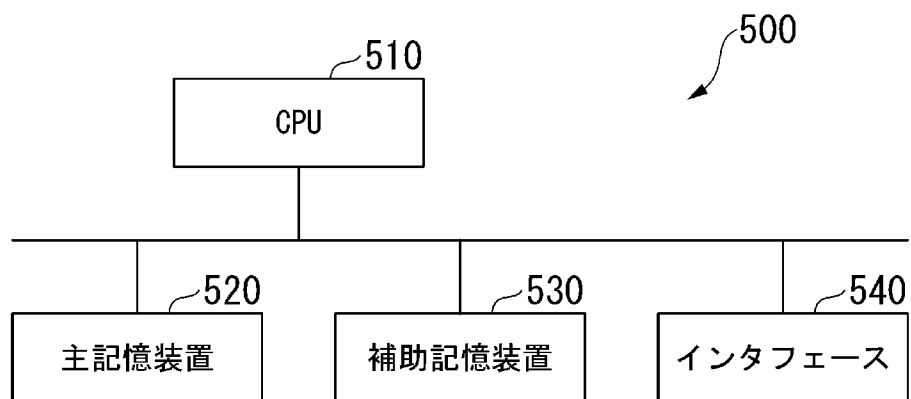
[図8]



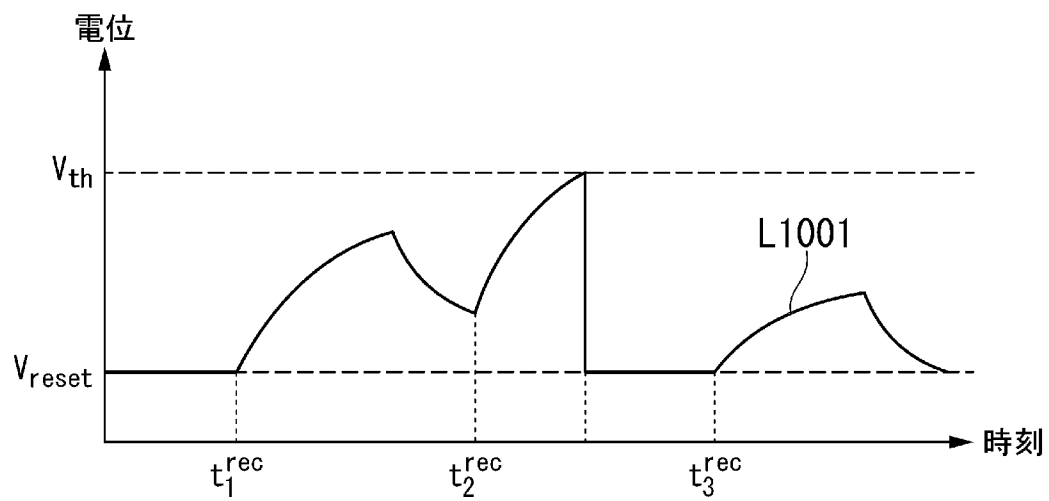
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/015878

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G06N3/04 (2006.01) i

FI: G06N3/04 190

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)

Int. Cl. G06N3/04

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 1971-2021

Registered utility model specifications of Japan 1996-2021

Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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.
A	US 2018/0357529 A1 (UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA) 13 December 2018	1-7
A	JP 2017-134821 A (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 03 August 2017	1-7

☐ 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
14.06.2021

Date of mailing of the international search report
22.06.2021

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/015878

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
---	------------------	---------------	------------------

US 2018/0357529 A1	13.12.2018	(Family: none)	
-----------------------	------------	----------------	--

JP 2017-134821 A	03.08.2017	US 2017/0213129 A1 EP 3200130 A1 KR 10-2017-0089217 A CN 106997485 A	
------------------	------------	---	--

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G06N 3/04(2006.01)i FI: G06N3/04 190														
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）） G06N3/04														
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 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2021年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2021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 - 2021年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年													
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）														
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												
A	US 2018/0357529 A1 (UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA) 13.12.2018 (2018 - 12 - 13)	1-7												
A	JP 2017-134821 A (三星電子株式会社) 03.08.2017 (2017 - 08 - 03)	1-7												
☐ 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 14.06.2021	国際調査報告の発送日 22.06.2021													
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） 大桃 由紀雄 5B 5583 電話番号 03-3581-1101 内線 3545													

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/JP2021/015878

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
US	2018/0357529	A1	13.12.2018	(ファミリーなし)			
JP	2017-134821	A	03.08.2017	US	2017/0213129	A1	
				EP	3200130	A1	
				KR	10-2017-0089217	A	
				CN	106997485	A	