

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 12 月 6 日 (06.12.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/218481 A1

(51) 国际专利分类号:

G06N 3/08 (2006.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2017/086547

(22) 国际申请日:

2017 年 5 月 31 日 (31.05.2017)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(71) 申请人: 深圳市大疆创新科技有限公司 (SZ DJI TECHNOLOGY CO., LTD.) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区高新区南区粤兴一道9号香港科大深圳产学研大楼6楼, Guangdong 518057 (CN)。

(72) 发明人: 潘为(PAN, Wei); 中国广东省深圳市南山区高新区南区粤兴一道9号香港科大深圳产学研大楼6楼, Guangdong 518057 (CN)。 崔健(CUI, Jian); 中国广东省深圳市南山区高新区南区粤兴一道9号香港科大深圳产学研大楼6楼, Guangdong 518057 (CN)。 林晓帆(LIN, Xiaofan); 中国广东省深圳市南山区高新区南区粤兴一道9号香港科大深圳产学研大楼6楼, Guangdong 518057 (CN)。

(CN)。 赵丛(ZHAO, Cong); 中国广东省深圳市南山区高新区南区粤兴一道9号香港科大深圳产学研大楼6楼, Guangdong 518057 (CN)。

(74) 代理人: 北京龙双利达知识产权代理有限公司 (LONGSUN LEAD IP LTD.); 中国北京市海淀区北清路68号院3号楼101, Beijing 100094 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): 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, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: NEURAL NETWORK TRAINING METHOD AND DEVICE, COMPUTER SYSTEM AND MOBILE DEVICE

(54) 发明名称: 神经网络训练的方法、装置、计算机系统和可移动设备

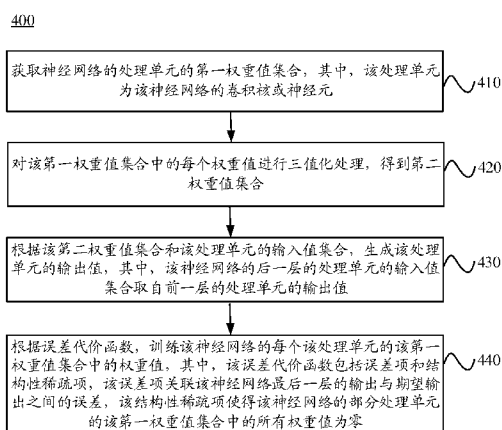


图4

(57) Abstract: A neural network training method and device, a computer system and a mobile device. The method comprises: acquiring a first weight set of processing units of a neural network (410); performing three-value processing on each weight in a first weight set to obtain a second weight set (420); generating an output value of the processing unit according to the second weight set and an input value set of the processing unit, wherein the input value set of the processing unit of the next layer of the neural network is taken from the output value of the processing unit of the previous layer (430); and training the weights in the first weight set of each processing unit of the neural network according to an error cost function, wherein the error cost function comprises an error term and a structural sparse term, the structural sparse term causing all weights in the first weight set of some of the processing units of the neural network to be zero (440). The described method may reduce the resource requirements of the neural network.

- 410 Acquire a first weight set of processing units of a neural network, wherein the processing units are a convolution kernel or a neuron of the neural network
- 420 Perform three-value processing on each weight in a first weight set to obtain a second weight set
- 430 Generate an output value of the processing units according to the second weight set and an input value set of the processing unit, wherein the input value set of the processing unit of the next layer of the neural network is taken from the output value of the processing unit of the previous layer
- 440 Train the weights in the first weight set of each processing unit of the neural network according to an error cost function, wherein the error cost function comprises an error term and a structural sparse term, the error term associating an error between the output of the last layer of the neural network and an expected output, and the structural sparse term causing all weights in the first weight set of some of the processing units of the neural network to be zero

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (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)。

根据细则4.17的声明：

- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))

本国际公布：

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种神经网络训练的方法、装置、计算机系统和可移动设备。该方法包括：获取神经网络的处理单元的第一权重值集合(410)；对该第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，得到第二权重值集合(420)；根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，生成该处理单元的输出值，其中，该神经网络的下一层的处理单元的输入值集合取自前一层的处理单元的输出值(430)；根据误差代价函数，训练该神经网络的每个该处理单元的该第一权重值集合中的权重值，其中，该误差代价函数包括误差项和结构性稀疏项，该结构性稀疏项使得该神经网络的部分该处理单元的该第一权重值集合中的所有权重值为零(440)。上述方法能够降低神经网络的资源需求。

神经网络训练的方法、装置、计算机系统和可移动设备

版权申明

5 [0001] 本专利文件披露的内容包含受版权保护的材料。该版权为版权所有人所有。版权所有人不反对任何人复制专利与商标局的官方记录和档案中所存在的该专利文件或者该专利披露。

技术领域

10 [0002] 本发明涉及信息技术领域，并且更具体地，涉及一种神经网络训练的方法、装置、计算机系统和可移动设备。

背景技术

15 [0003] 传统的神经网络中权重值以及神经元的输出都是实数，一个神经网络前向传播时甚至需要上 $G(10^9)$ 次的乘加运算。这就使得虽然大规模的神经网络在如目标检测、人脸识别、图像分割、目标跟踪、语义分割、语音识别等智能功能上能够有很好的表现，也很难将神经网络用在资源受限又要求低功耗的平台（比如无人机、自动驾驶、机器人、智能可穿戴设备、智能家电、智能手机等）上。

20 [0004] 然而，高级计算平台，又因为体积庞大、功耗巨大、重量巨大等原因无法大规模用在产品当中。与之相对地，上述资源受限平台对上述各种智能功能的需求越来越大。

[0005] 因此，如何降低神经网络的资源需求，成为一个亟待解决的技术问题。

发明内容

25 [0006] 本发明实施例提供了一种神经网络训练的方法、装置、计算机系统和可移动设备，能够降低神经网络的资源需求。

[0007] 第一方面，提供了一种神经网络训练的方法，包括：获取神经网络的处理单元的第一权重值集合，其中，该处理单元为该神经网络的卷积核或神经元；对该第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，得到第二权重值集合；根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，生成该处理单元的输出值，其中，该神经网络的后一层的处理单元的输入值集合取自前一

30

层的处理单元的输出值；根据误差代价函数，训练该神经网络的每个该处理单元的该第一权重值集合中的权重值，其中，该误差代价函数包括误差项和结构性稀疏项，该误差项关联该神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差，该结构性稀疏项使得该神经网络的部分该处理单元的该第一权重值集合中的所有权重值为零。

[0008] 第二方面，提供了一种神经网络训练的装置，包括：获取模块，用于获取神经网络的处理单元的第一权重值集合，其中，该处理单元为该神经网络的卷积核或神经元；三值化处理模块，用于对该第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，得到第二权重值集合；运算模块，用于根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，生成该处理单元的输出值，其中，该神经网络的最后一层的处理单元的输入值集合取自前一层的处理单元的输出值；训练模块，用于根据误差代价函数训练该神经网络的每个该处理单元的该第一权重值集合中的权重值，其中，该误差代价函数包括误差项和结构性稀疏项，该误差项关联该神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差，该结构性稀疏项使得该神经网络的部分该处理单元的该第一权重值集合中的所有权重值为零。。

[0009] 第三方面，提供了一种计算机系统，包括：存储器，用于存储计算机可执行指令；处理器，用于访问所述存储器，并执行所述计算机可执行指令，以进行上述第一方面的方法中的操作。

[0010] 第四方面，提供了一种移动设备，包括：上述第二方面的神经网络训练的装置；或者，上述第三方面的计算机系统。

[0011] 第五方面，提供了一种计算机存储介质，该计算机存储介质中存储有程序代码，该程序代码可以用于指示执行上述第一或第二方面的方法。

[0012] 本发明实施例的技术方案，通过将神经网络的权重值三值化和激活值二值化，以及在误差代价函数中引入结构性稀疏项，可以在神经网络的性能减少地非常小的前提下，大幅度降低神经网络的存储量和计算量，从而能够降低神经网络的资源需求。

附图说明

[0013] 图 1 是神经网络的示意图。

[0014] 图 2 是应用本发明实施例的技术方案的架构图。

[0015] 图 3 是本发明实施例的可移动设备的示意性架构图。

[0016] 图 4 是本发明实施例的神经网络训练的方法的示意性流程图。

[0017] 图 5 是本发明实施例的三值化函数的图像。

[0018] 图 6 是本发明实施例的二值化函数的图像。

5 [0019] 图 7 是本发明实施例的激活函数的图像。

[0020] 图 8 是本发明实施例的神经网络训练的装置的示意性框图。

[0021] 图 9 是本发明实施例的计算机系统的示意性框图。

具体实施方式

10 [0022] 下面将结合附图，对本发明实施例中的技术方案进行描述。

[0023] 应理解，本文中的具体的例子只是为了帮助本领域技术人员更好地理解本发明实施例，而非限制本发明实施例的范围。

[0024] 还应理解，本发明实施例中的公式只是一种示例，而非限制本发明实施例的范围，各公式可以进行变形，这些变形也应属于本发明保护的范围。

15 [0025] 还应理解，在本发明的各种实施例中，各过程的序号的大小并不意味着执行顺序的先后，各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定，而不应对本发明实施例的实施过程构成任何限定。

[0026] 还应理解，本说明书中描述的各种实施方式，既可以单独实施，也可以组合实施，本发明实施例对此并无限定。

20 [0027] 本发明实施例的技术方案可以应用于各种神经网络中。

[0028] 图 1 示出了神经网络的示意图。如图 1 所示，神经网络可以包括输入层，一个或多个隐含层，输出层。神经网络中的隐含层可以全为全连接层，也可以包括卷积层和全连接层，后者称为卷积神经网络。

25 [0029] 在本发明实施例中，神经网络的处理单元可以为卷积核或神经元。也就是说，对于卷积层，处理单元为卷积核；对于全连接层，处理单元为神经元。

30 [0030] 为了使得神经网络能够运用在资源受限的平台上，本发明实施例提供了一种技术方案，通过将神经网络的权重值三值化和响应值（激活值）二值化，大幅度降低神经网络的存储量和计算量，另外，通过在误差代价函数中引入结构性稀疏项，可以使得一些处理单元的权重值为零，从而进一步降低存储量和计算量。

[0031] 应理解，本发明实施例的技术方案既可以应用于资源受限的平台，也可以应用于其他计算平台，本发明实施例对此并不限定。

[0032] 图 2 是应用本发明实施例的技术方案的架构图。图 2 中系统 200 可以为各种应用神经网络的平台。

5 [0033] 如图 2 所示，系统 200 可以接收输入数据 202，对输入数据 202 进行处理，得到输出数据 208。在一些实施例中，系统 200 中的部件可以由一个或多个处理器实现，该处理器可以是计算设备中的处理器，也可以是可移动设备（例如无人机）中的处理器。该处理器可以为任意种类的处理器，本发明实施例对此不做限定。在一些实施例中，该处理器可以由处理电路组成的芯片。在一些实施例中，系统 200 中还可以包括一个或多个存储器。该存储器可用于存储指令和数据，例如，实现本发明实施例的技术方案的计算机可执行指令，以及数据等。该存储器可以为任意种类的存储器，本发明实施例对此也不做限定。

15 [0034] 在一些设计中，上述资源受限的平台可以为可移动设备或者智能设备。该可移动设备也可以称为移动设备。该可移动设备可以是无人机、无人驾驶船、自动驾驶车辆或机器人等；该智能设备可以为智能可穿戴设备、智能家电、智能手机等，但本发明实施例对此并不限定。

[0035] 图 3 是本发明实施例的可移动设备 300 的示意性架构图。

20 [0036] 如图 3 所示，可移动设备 300 可以包括动力系统 310、控制系统 320、传感系统 330 和处理系统 340。

[0037] 动力系统 310 用于为该可移动设备 300 提供动力。

25 [0038] 以无人机为例，无人机的动力系统可以包括电子调速器（简称为电调）、螺旋桨以及与螺旋桨相对应的电机。电机连接在电子调速器与螺旋桨之间，电机和螺旋桨设置在对应的机臂上；电子调速器用于接收控制系统产生的驱动信号，并根据驱动信号提供驱动电流给电机，以控制电机的转速。电机用于驱动螺旋桨旋转，从而为无人机的飞行提供动力。

30 [0039] 传感系统 330 可以用于测量可移动设备 300 的姿态信息，即可移动设备 300 在空间的位置信息和状态信息，例如，三维位置、三维角度、三维速度、三维加速度和三维角速度等。传感系统 330 例如可以包括陀螺仪、电子罗盘、惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU）、视觉传感器、全球定位系统（Global Positioning System, GPS）、气压计、空速计等传感器中的

至少一种。

[0040] 传感系统 330 还可用于采集图像，即传感系统 330 包括用于采集图像的传感器，例如相机等。

5 [0041] 控制系统 320 用于控制可移动设备 300 的移动。控制系统 320 可以按照预先设置的程序指令对可移动设备 300 进行控制。例如，控制系统 320 可以根据传感系统 330 测量的可移动设备 300 的姿态信息控制可移动设备 300 的移动。控制系统 320 也可以根据来自遥控器的控制信号对可移动设备 300 进行控制。例如，对于无人机，控制系统 320 可以为飞行控制系统（飞控），或者为飞控中的控制电路。

10 [0042] 处理系统 340 可以处理传感系统 330 采集的图像。例如，处理系统 340 可以为图像信号处理（Image Signal Processing, ISP）类芯片。

[0043] 处理系统 340 可以为图 2 中的系统 200，或者，处理系统 340 可以包括图 2 中的系统 200。

15 [0044] 应理解，上述对于可移动设备 300 的各组成部件的划分和命名仅仅是示例性的，并不应理解为对本发明实施例的限制。

[0045] 还应理解，可移动设备 300 还可以包括图 3 中未示出的其他部件，本发明实施例对此并不限定。

20 [0046] 图 4 示出了本发明一个实施例的神经网络训练的方法 400 的示意性流程图。该方法 400 可以由图 2 所示的系统 200 执行；或者由图 3 所示的可移动设备 300 执行。具体地，在由可移动设备 300 执行时，可以由图 3 中的处理系统 340 执行。

[0047] 410，获取神经网络的处理单元的第一权重值集合，其中，该处理单元为该神经网络的卷积核或神经元。

25 [0048] 第一权重值集合中的权重值为待训练的权重值。也就是说，训练神经网络的过程为训练神经网络的每个处理单元的第一权重值集合中的权重值的过程。

[0049] 神经网络的处理单元可以为卷积核或神经元。对于卷积层，处理单元为卷积核；对于全连接层，处理单元为神经元。

30 [0050] 420，对该第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，得到第二权重值集合。

[0051] 在本发明实施例中，为了减少计算量和存储量，对权重值进行三值化

处理。即，将权重值按照其所处的取值范围处理为三个值中的一个。例如，该三个值可以为{-1, 0, +1}。

[0052] 可选地，若第一权重值在预设范围内，则将该第一权重值三值化处理为零，其中，该第一权重值表示该第一权重值集合中的权重值；

5 [0053] 若该第一权重值在该预设范围之上，则将该第一权重值三值化处理为1；

[0054] 若该第一权重值在该预设范围之下，则将该第一权重值三值化处理为-1。

10 [0055] 例如，可以将该第一权重值输入以下函数（1）得到三值化后的权重值。

$$T_{\theta}(W) = \begin{cases} 1, & W \geq \theta \\ 0, & \theta < W < -\theta \\ -1, & W \leq -\theta \end{cases} \quad (1)$$

[0056] 其中，W表示该第一权重值， θ 为预设值。该预设值 θ 可以为较小的正实数，例如，可以为0.3。上述 $T_{\theta}(W)$ 函数图像可以如图5所示。

15 [0057] 第一权重值集合中的权重值三值化处理后的权重值，形成第二权重值集合。

[0058] 权重值三值化处理，位数比较少，因此能够减少数据的存储量，而且还能降低后续运算的计算量。

20 [0059] 430，根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，生成该处理单元的输出值，其中，该神经网络的后一层的处理单元的输入值集合取自前一层的处理单元的输出值。

25 [0060] 在本发明实施例中，根据该第二权重值集合（即三值化处理后的权重值的集合）和输入值集合，生成输出值。处理单元的输入值集合取自前一层的处理单元的输出值。例如，对于全连接层的神经元，其输入值集合为前一层的处理单元的输入值集合；对于卷积层的卷积核，其输入值集合为该卷积核对应的前一层的输出值的集合。

[0061] 可选地，处理单元的输出值为二值化处理后的值。

[0062] 在一个实施例中，可以根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，得到响应值；对该响应值进行二值化处理，得到该处理单元输出值。

30 [0063] 具体而言，对于每个处理单元，可以对该第二权重值集合对应的向量和该处理单元的输入值集合对应的向量做内积，得到该响应值；再对该响应

值进行二值化处理，得到该处理单元输出值。

[0064] 可选地，在对该响应值进行二值化处理之前，还可以先对该响应值进行批规范化（Batch normalization）处理，以防止响应值变化范围不可控而影响训练时的收敛。

5 [0065] 可选地，该二值化处理可以为将该响应值处理为 1 和 0 中的一个值。

[0066] 具体地，若该响应值大于预定值，则将该处理单元输出值处理为 1；若该响应值不大于该预定值，则将该处理单元输出值处理为 0。

[0067] 例如，可以按照以下函数（2）对响应值进行二值化处理，得到处理单元输出值。

10
$$B(r) = \begin{cases} 1, & r > 0.5 \\ 0, & r \leq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

[0068] 其中， r 表示响应值， $B(r)$ 表示处理单元输出值。

[0069] 上述 $B(r)$ 函数图像可以如图 6 所示。

[0070] 在采用二值化处理时，上述二值化函数可作为激活函数，其输出为激活值。

15 [0071] 应理解，也可以同时采用激活函数和二值化函数，也就是说，可以先将响应值输入激活函数得到激活值，再将激活值输入二值化函数，得到处理单元输出值，该方式也作为本发明的一个实施例。

[0072] 440，根据误差代价函数，训练该神经网络的每个该处理单元的该第一权重值集合中的权重值，其中，该误差代价函数包括误差项和结构性稀疏项，该误差项关联该神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差，该结构性稀疏项使得该神经网络的部分处理单元的该第一权重值集合中的所有权重值为零。

20

[0073] 训练神经网络的过程为训练神经网络的每个处理单元的第一权重值集合中的权重值的过程。在本发明实施例中，可选地，可以调整该神经网络的每个处理单元的该第一权重值集合中的权重值，以使上述误差代价函数的代价达到预定代价或最小化，其中，在训练过程中，每个处理单元的输出值可以按照前述方式得到。

25

[0074] 在本发明实施例中，误差代价函数除了包括误差项外，还包括结构性稀疏项。该误差项关联该神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差，即训练过程中神经网络的输出与样本对应的真实值之间的误差。该结构性稀疏项可以使得该神经网络的部分处理单元的该第一权重值集合中的所有权重

30

重值为零。

[0075] 例如，该误差代价函数可以为以下函数 (3)，

$$C(W) = E(W) + \lambda \sum_{l=1}^L \sum_{k_l=1}^{K_l} \|W_{:, :, :, k_l}^l\|_F, \quad (3)$$

[0076] 其中， W 表示第一权重值集合对应的向量， C 表示误差代价函数， E 表示误差项， F 表示 Frobenius 范数， L 表示神经网络的层数， K_l 表示神经网络的第 l 层的卷积核数或神经元数， λ 表示正则化系数。

[0077] 函数 (3) 中最右边一项为结构性稀疏项。在该项中，将每个卷积核或神经元的范数都加起来作为代价的一部分。对于一个卷积核或神经元，其所有权重值都是零才没有这个代价。这样，在训练过程中，神经网络就会出现结构性稀疏的特性，即某些处理单元的所有权重值为零。因此，这些处理单元就可以去掉，从而进一步降低存储量和计算量。

[0078] 可选地，在训练过程中，可以先确定该误差代价函数对第二权重值的导数；再根据该导数调整第一权重值，其中，该第一权重值表示该第一权重值集合中的权重值，该第二权重值表示该第一权重值在当前调整前的三值化处理后的值。

[0079] 例如，可以根据以下公式 (4) 调整该第一权重值，

$$W = W - \eta * \frac{\partial C}{\partial wt} \quad (4)$$

[0080] 其中， W 表示第一权重值， wt 表示第二权重值， C 表示误差代价函数， η 表示学习速率。

[0081] 由于像二值化函数这种阶跃函数的导数除一点不可导外都为零，这样无法求导，因此，可以根据无二值化处理的激活函数确定上述导数。也就是说，在训练过程中，仅在前向传播时用二值化函数，而在反向传播求导时还按照二值化之前的网络结构进行求导。

[0082] 可选地，当反向传播经过 $B(r)$ 函数时，可以近似用图 7 中实线所示函数进行求导。

[0083] 可选地，当反向传播经过 $T_\theta(W)$ 函数时，可以按照 $y=x$ 函数进行求导，也就是说，在链式求导过程中忽略 $T_\theta(W)$ 函数。

[0084] 这样，可以在近似意义上使训练出的神经网络也能表现出不错的性能，节约了大量的存储量和计算量，而这种近似带来的损失也能够通过稍微扩大

网络规模来弥补。这种被二值化的网络在前向传播时的处理就全部变成了位操作，可以在专用硬件上大规模集成，提高效率，减小功耗。

[0085] 本发明实施例的技术方案，通过将神经网络的权重值三值化和激活值二值化，以及在误差代价函数中引入结构性稀疏项，可以在神经网络的性能减少地非常小的前提下，大幅度降低神经网络的存储量和计算量，从而能够降低神经网络的资源需求。

[0086] 可选地，在权重值三值化和激活值二值化的情况下，神经网络中的运算可以通过位操作实现。

[0087] 对于权重值 $w \in \{-1, 0, +1\}$ ，激活值 $a \in \{0, 1\}$ ，首先用两位二进制数表示 w ，用一位二进制数表示 a 。

[0088] w 为 -1 时表示为 11， w 为 0 时表示为 00， w 为 +1 表示为 01。 a 为 1 时表示为 1， a 为零时表示为 0。以下是 w 与 a 相乘的真值表。

表 1

	$w = 11$	$w = 01$	$w = 00$
$a = 0$	00	00	00
$a = 1$	11	01	00

[0089] 神经网络中的运算大部分是向量的数量积，也叫点积、内积，即两个向量对应位置相乘然后再各个位置相加。对于要做数量积的两个向量 A 和 W ， A 存激活值（一位的）， W 存权重值（两位的），即一个寄存器 A （ n 比特）能存放 n 个 a （激活值），两个寄存器 $W1$ 和 $W0$ （都是 n 比特）能够存储 n 个 w （权重值）， $W1$ 存权重值高位， $W0$ 存权重值低位。

[0090] 计算激活值和权重值的数量积就可以用下列方法，其中， C 表示 A 向量和 W 向量对应位置相乘得到的结果向量， $\&$ 表示“按位与”。

[0091]（低位寄存器） $C0 = A \& W0$ ，

[0092]（高位寄存器） $C1 = A \& W1$ 。

[0093] 然后把 C 向量中每个数求和，也可以用位操作来实现。

[0094] $SUM = \text{bitcount}(C0 \text{ XOR } C1) - \text{bitcount}(C0 \& C1)$ 。

[0095] 其中， XOR 表示“按位异或”， bitcount 表示数一个寄存器中有多少个 1，绝大多数计算平台都支持 bitcount 操作。 SUM 所得为 C 向量所有元素的和。

[0096] 这样，在 7 个计算周期内就完成了 n 次乘加操作。如果硬件同时并行

操作的位数越多，这种方法就越有优势。

[0097] 上文详细描述了本发明实施例的神经网络训练的方法，下面将描述本发明实施例的神经网络训练的装置、计算机系统和可移动设备。应理解，本发明实施例的神经网络训练的装置、计算机系统和可移动设备可以执行前述
5 本发明实施例的各种方法，即以下各种产品的具体工作过程，可以参考前述方法实施例中的对应过程。

[0098] 图 8 示出了本发明实施例的神经网络训练的装置 800 的示意性框图。如图 8 所示，该装置 800 可以包括：

[0099] 获取模块 810，用于获取神经网络的处理单元的第一权重值集合，其中，该处理单元为该神经网络的卷积核或神经元；
10

[00100] 三值化处理模块 820，用于对该第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，得到第二权重值集合；

[00101] 运算模块 830，用于根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，生成该处理单元的输出值，其中，该神经网络的最后一层的处理单元的
15 输入值集合取自前一层的处理单元的输出值；

[00102] 训练模块 840，用于根据误差代价函数训练该神经网络的每个该处理单元的该第一权重值集合中的权重值，其中，该误差代价函数包括误差项和结构性稀疏项，该误差项关联该神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差，该结构性稀疏项使得该神经网络的部分该处理单元的该第一权重
20 集合中的所有权重值为零。

[00103] 可选地，该三值化处理模块 820 用于：

[00104] 若第一权重值在预设范围内，则将该第一权重值三值化处理为零，其中，该第一权重值表示该第一权重值集合中的权重值；

[00105] 若该第一权重值在该预设范围之上，则将该第一权重值三值化处
25 理为 1；

[00106] 若该第一权重值在该预设范围之下，则将该第一权重值三值化处
理为-1。

[00107] 可选地，该运算模块 830 用于：

[00108] 根据该第二权重值集合和该处理单元的输入值集合，得到响应值；

30 [00109] 对该响应值进行二值化处理，得到该处理单元输出值。

[00110] 可选地，该运算模块 830 用于：

[00111] 对该第二权重值集合对应的向量和该处理单元的输入值集合对应的向量做内积，得到该响应值。

[00112] 可选地，该运算模块 830 用于在对该响应值进行二值化处理之前，对该响应值进行批规范化处理。

5 [00113] 可选地，该运算模块 830 用于：

[00114] 若该响应值大于预定值，则将该处理单元输出值处理为 1；

[00115] 若该响应值不大于该预定值，则将该处理单元输出值处理为 0。

[00116] 可选地，该训练模块 840 用于：

10 [00117] 调整该神经网络的每个该处理单元的该第一权重值集合中的权重值，以使该误差代价函数的代价达到预定代价或最小化。

[00118] 可选地，该训练模块 840 用于：

[00119] 确定该误差代价函数对第二权重值的导数；

15 [00120] 根据该导数调整第一权重值，其中，该第一权重值表示该第一权重值集合中的权重值，该第二权重值表示该第一权重值在当前调整前的三值化处理后的值。

[00121] 可选地，该训练模块 840 用于：

[00122] 根据无二值化处理的激活函数确定该导数。

[00123] 应理解，上述本发明实施例的神经网络训练的装置可以是芯片，其具体可以由电路实现，但本发明实施例对具体的实现形式不做限定。

20 [00124] 本发明实施例还提供了一种处理器，该处理器可以包括上述本发明各种实施例的神经网络训练的装置。

[00125] 图 9 示出了本发明实施例的计算机系统 900 的示意性框图。

[00126] 如图 9 所示，该计算机系统 900 可以包括处理器 910 和存储器 920。

25 [00127] 应理解，该计算机系统 900 还可以包括其他计算机系统中通常所包括的部件，例如，输入输出设备、通信接口等，本发明实施例对此并不限定。

[00128] 存储器 920 用于存储计算机可执行指令。

30 [00129] 存储器 920 可以是各种种类的存储器，例如可以包括高速随机存取存储器（Random Access Memory，RAM），还可以包括非不稳定的存储器（non-volatile memory），例如至少一个磁盘存储器，本发明实施例对此并不限定。

[00130] 处理器 90 用于访问该存储器 920, 并执行该计算机可执行指令, 以进行上述本发明各种实施例的神经网络训练的方法中的操作。

[00131] 处理器 910 可以包括微处理器, 现场可编程门阵列 (Field - Programmable Gate Array, FPGA), 中央处理器 (Central Processing unit, CPU), 图形处理器 (Graphics Processing Unit, GPU) 等, 本发明实施例对此并不限定。

[00132] 本发明实施例还提供了一种可移动设备, 该移动设备可以包括上述本发明各种实施例的神经网络训练的装置、处理器或者计算机系统。

[00133] 本发明实施例的神经网络训练的装置、计算机系统和可移动设备可对应于本发明实施例的神经网络训练的方法的执行主体, 并且神经网络训练的装置、计算机系统和可移动设备中的各个模块的上述和其它操作和/或功能分别为了实现前述各个方法的相应流程, 为了简洁, 在此不再赘述。

[00134] 本发明实施例还提供了一种计算机存储介质, 该计算机存储介质中存储有程序代码, 该程序代码可以用于指示执行上述本发明实施例的神经网络训练的方法。

[00135] 应理解, 在本发明实施例中, 术语“和/或”仅仅是一种描述关联对象的关联关系, 表示可以存在三种关系。例如, A 和/或 B, 可以表示: 单独存在 A, 同时存在 A 和 B, 单独存在 B 这三种情况。另外, 本文中字符“/”, 一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。

[00136] 本领域普通技术人员可以意识到, 结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤, 能够以电子硬件、计算机软件或者二者的结合来实现, 为了清楚地说明硬件和软件的可互换性, 在上述说明中已经按照功能一般性地描述了各示例的组成及步骤。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行, 取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能, 但是这种实现不应认为超出本发明的范围。

[00137] 所属领域的技术人员可以清楚地了解到, 为了描述的方便和简洁, 上述描述的系统、装置和单元的具体工作过程, 可以参考前述方法实施例中的对应过程, 在此不再赘述。

[00138] 在本申请所提供的几个实施例中, 应该理解到, 所揭露的系统、装置和方法, 可以通过其它的方式实现。例如, 以上所描述的装置实施例仅

仅是示意性的，例如，所述单元的划分，仅仅为一种逻辑功能划分，实际实现时可以有另外的划分方式，例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统，或一些特征可以忽略，或不执行。另外，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口、装置或单元的间接耦合或通信连接，也可以是电的，机械的或其它的形式连接。

[00139] 所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本发明实施例方案的目的。

[00140] 另外，在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以是两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能单元的形式实现。

[00141] 所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分，或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可以是个人计算机，服务器，或者网络设备）执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U 盘、移动硬盘、只读存储器（ROM，Read-Only Memory）、随机存取存储器（RAM，Random Access Memory）、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[00142] 以上所述，仅为本发明的具体实施方式，但本发明的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内，可轻易想到各种等效的修改或替换，这些修改或替换都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此，本发明的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

权利要求

1. 一种神经网络训练的方法，其特征在于，包括：

获取神经网络的处理单元的第一权重值集合，其中，所述处理单元为所述神经网络的卷积核或神经元；

5 对所述第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，得到第二权重值集合；

根据所述第二权重值集合和所述处理单元的输入值集合，生成所述处理单元的输出值，其中，所述神经网络的最后一层的处理单元的输入值集合取自前一层处理单元的输入值；

10 根据误差代价函数，训练所述神经网络的每个所述处理单元的所述第一权重值集合中的权重值，其中，所述误差代价函数包括误差项和结构性稀疏项，所述误差项关联所述神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差，所述结构性稀疏项使得所述神经网络的部分所述处理单元的所述第一权重值集合中的所有权重值为零。

15 2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述对所述第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理，包括：

若第一权重值在预设范围内，则将所述第一权重值三值化处理为零，其中，所述第一权重值表示所述第一权重值集合中的权重值；

20 若所述第一权重值在所述预设范围之上，则将所述第一权重值三值化处
理为 1；

若所述第一权重值在所述预设范围之下，则将所述第一权重值三值化处
理为-1。

25 3. 根据权利要求 1 或 2 所述的方法，其特征在于，所述根据所述第二权重值集合和所述处理单元的输入值集合，生成所述处理单元的输入值，包
括：

根据所述第二权重值集合和所述处理单元的输入值集合，得到响应值；
对所述响应值进行二值化处理，得到所述处理单元输出值。

4. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述根据所述第二权重值集合和所述处理单元的输入值集合，得到响应值，包括：

30 对所述第二权重值集合对应的向量和所述处理单元的输入值集合对应的向量做内积，得到所述响应值。

5. 根据权利要求 3 或 4 所述的方法, 其特征在于, 在所述对所述响应值进行二值化处理之前, 还包括:

对所述响应值进行批规范化处理。

6. 根据权利要求 3 至 5 中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述对所述响应值进行二值化处理, 包括:

若所述响应值大于预定值, 则将所述处理单元输出值处理为 1;

若所述响应值不大于所述预定值, 则将所述处理单元输出值处理为 0。

7. 根据权利要求 1 至 6 中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述根据误差代价函数, 训练所述神经网络的每个所述处理单元的所述第一权重值集合中的权重值, 包括:

调整所述神经网络的每个所述处理单元的所述第一权重值集合中的权重值, 以使所述误差代价函数的代价达到预定代价或最小化。

8. 根据权利要求 7 所述的方法, 其特征在于, 所述调整所述神经网络的每个所述处理单元的所述第一权重值集合中的权重值, 包括:

15 确定所述误差代价函数对第二权重值的导数;

根据所述导数调整第一权重值, 其中, 所述第一权重值表示所述第一权重值集合中的权重值, 所述第二权重值表示所述第一权重值在当前调整前的三值化处理后的值。

9. 根据权利要求 8 所述的方法, 其特征在于, 所述确定所述误差代价函数对第二权重值的导数, 包括:

根据无二值化处理的激活函数确定所述导数。

10. 一种神经网络训练的装置, 其特征在于, 包括:

获取模块, 用于获取神经网络的处理单元的第一权重值集合, 其中, 所述处理单元为所述神经网络的卷积核或神经元;

25 三值化处理模块, 用于对所述第一权重值集合中的每个权重值进行三值化处理, 得到第二权重值集合;

运算模块, 用于根据所述第二权重值集合和所述处理单元的输入值集合, 生成所述处理单元的输出值, 其中, 所述神经网络的最后一层的处理单元的输入值集合取自前一层的处理单元的输出值;

30 训练模块, 用于根据误差代价函数训练所述神经网络的每个所述处理单元的所述第一权重值集合中的权重值, 其中, 所述误差代价函数包括误差项

和结构性稀疏项,所述误差项关联所述神经网络最后一层的输出与期望输出之间的误差,所述结构性稀疏项使得所述神经网络的部分所述处理单元的所述第一权重值集合中的所有权重值为零。

5 11. 根据权利要求 10 所述的装置,其特征在于,所述三值化处理模块用于:

若第一权重值在预设范围内,则将所述第一权重值三值化处理为零,其中,所述第一权重值表示所述第一权重值集合中的权重值;

若所述第一权重值在所述预设范围之上,则将所述第一权重值三值化处理为 1;

10 若所述第一权重值在所述预设范围之下,则将所述第一权重值三值化处理为-1。

12. 根据权利要求 10 或 11 所述的装置,其特征在于,所述运算模块用于:

15 根据所述第二权重值集合和所述处理单元的输入值集合,得到响应值;对所述响应值进行二值化处理,得到所述处理单元输出值。

13. 根据权利要求 12 所述的装置,其特征在于,所述运算模块用于:

对所述第二权重值集合对应的向量和所述处理单元的输入值集合对应的向量做内积,得到所述响应值。

20 14. 根据权利要求 12 或 13 所述的装置,其特征在于,所述运算模块用于在对所述响应值进行二值化处理之前,对所述响应值进行批规范化处理。

15. 根据权利要求 12 至 14 中任一项所述的装置,其特征在于,所述运算模块用于:

若所述响应值大于预定值,则将所述处理单元输出值处理为 1;

若所述响应值不大于所述预定值,则将所述处理单元输出值处理为 0。

25 16. 根据权利要求 10 至 15 中任一项所述的装置,其特征在于,所述训练模块用于:

调整所述神经网络的每个所述处理单元的所述第一权重值集合中的权重值,以使所述误差代价函数的代价达到预定代价或最小化。

17. 根据权利要求 16 所述的装置,其特征在于,所述训练模块用于:

30 确定所述误差代价函数对第二权重值的导数;

根据所述导数调整第一权重值,其中,所述第一权重值表示所述第一权

重值集合中的权重值，所述第二权重值表示所述第一权重值在当前调整前的三值化处理后的值。

18. 根据权利要求 17 所述的装置，其特征在于，所述训练模块用于：
根据无二值化处理的激活函数确定所述导数。

5

19. 一种计算机系统，其特征在于，包括：

存储器，用于存储计算机可执行指令；

处理器，用于访问所述存储器，并执行所述计算机可执行指令，以进行
根据权利要求 1 至 9 中任一项所述的方法中的操作。

20. 一种可移动设备，其特征在于，包括：

10

根据权利要求 10 至 18 中任一项所述的神经网络训练的装置。

21. 一种可移动设备，其特征在于，包括：

根据权利要求 19 所述的计算机系统。

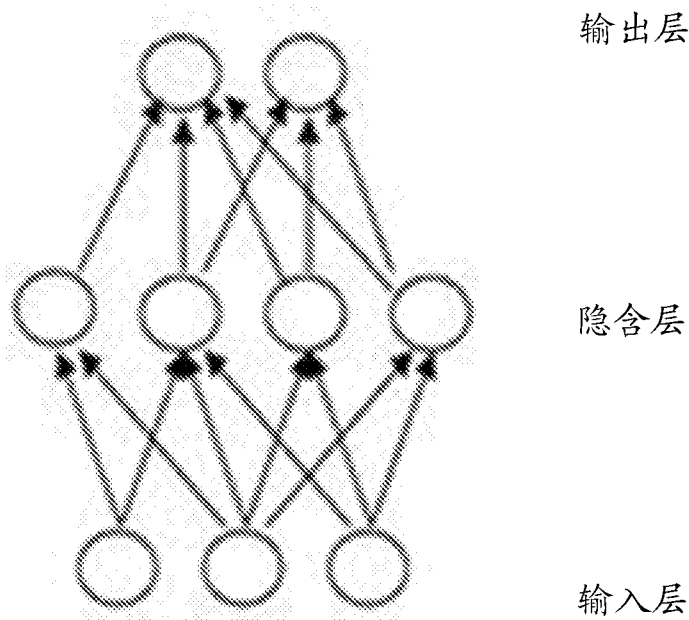


图1

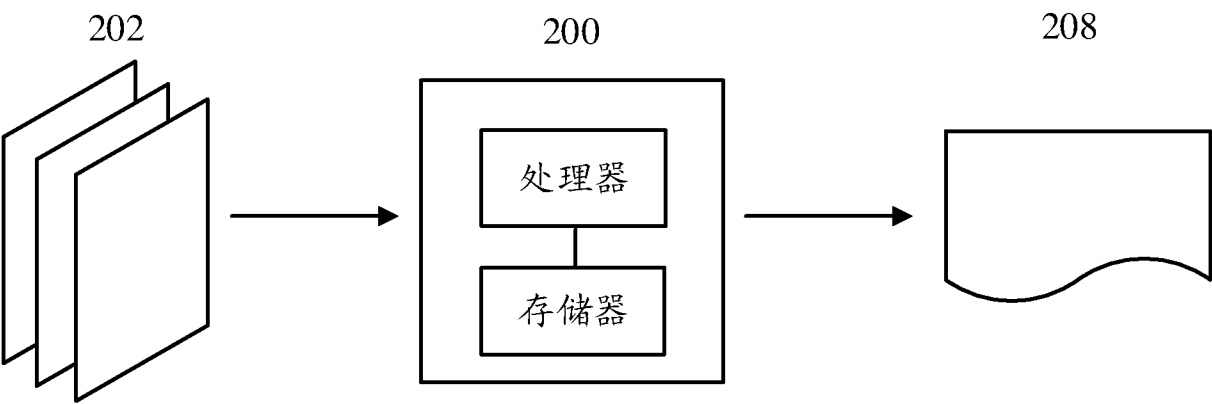


图2

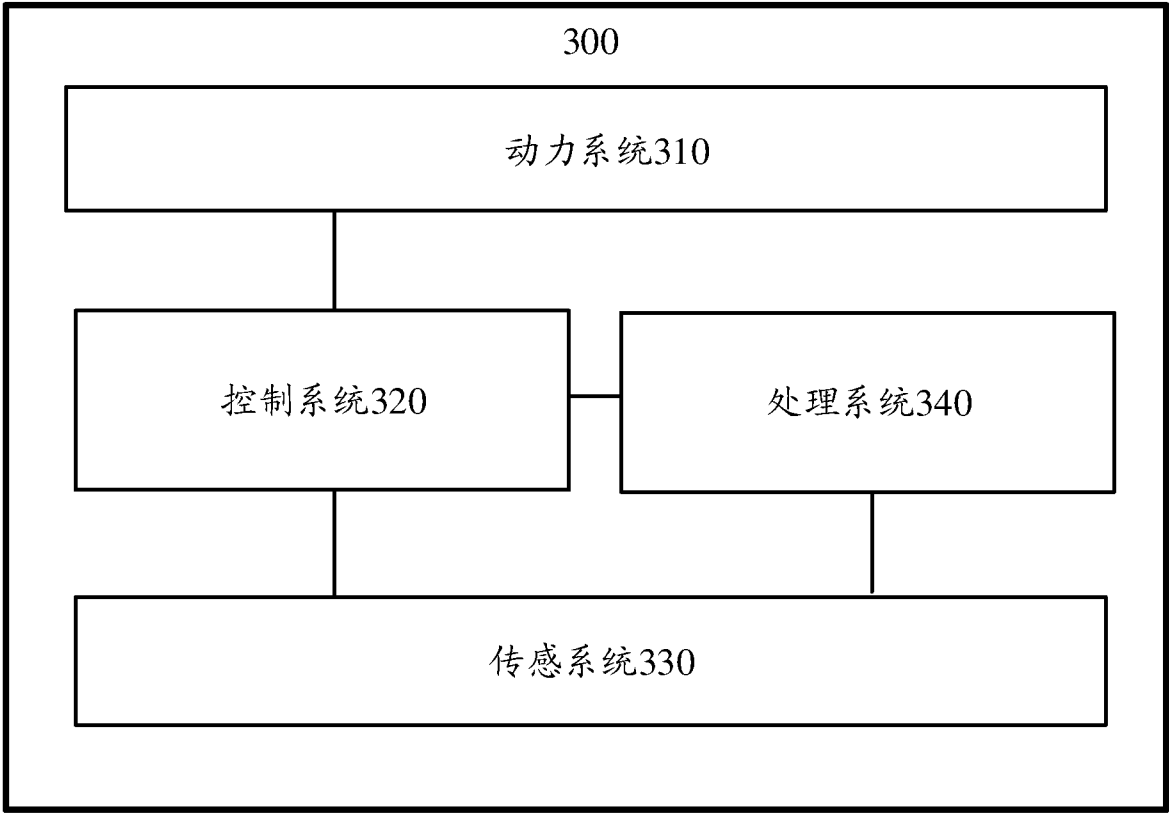


图3

400

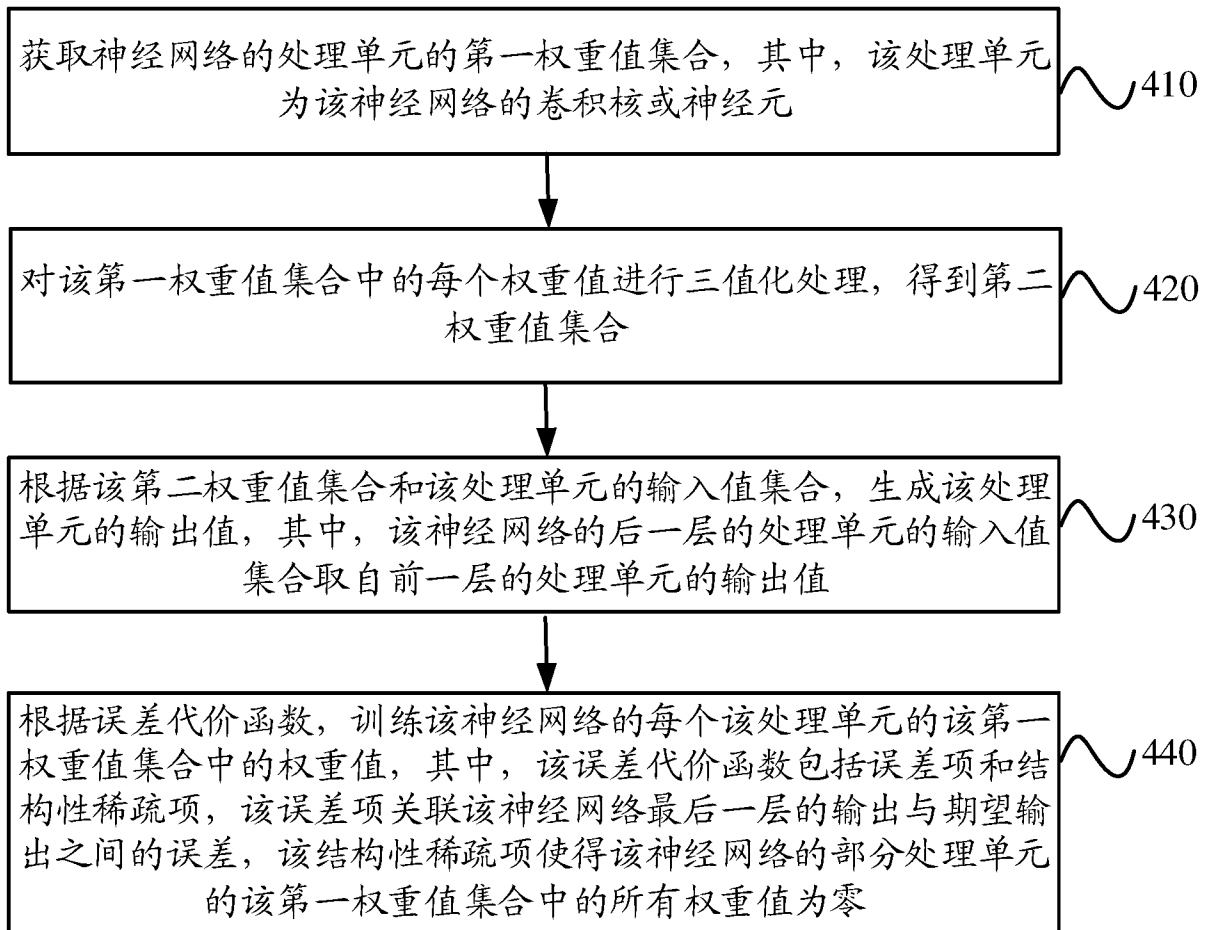


图4

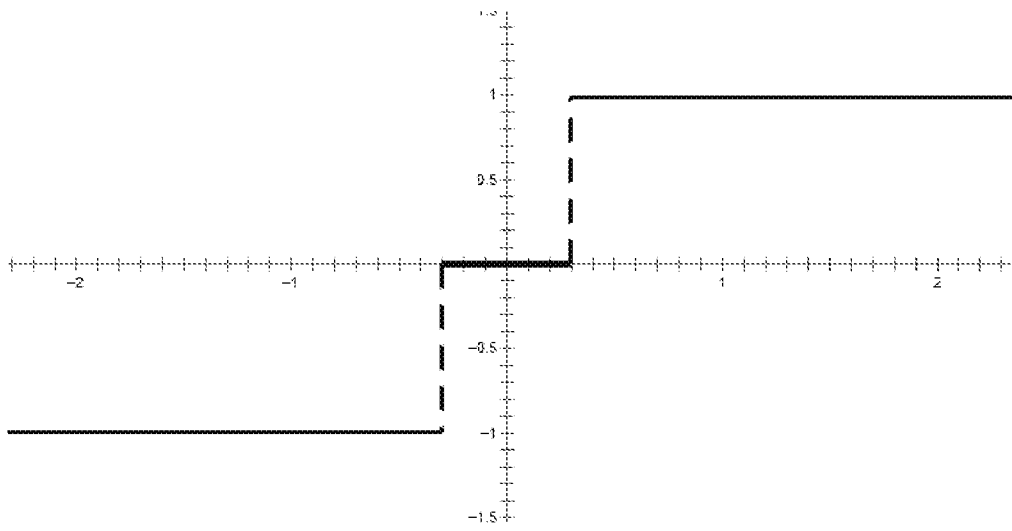


图 5

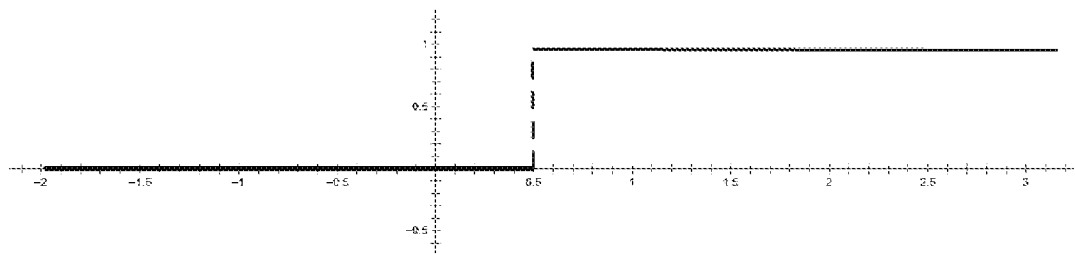


图 6

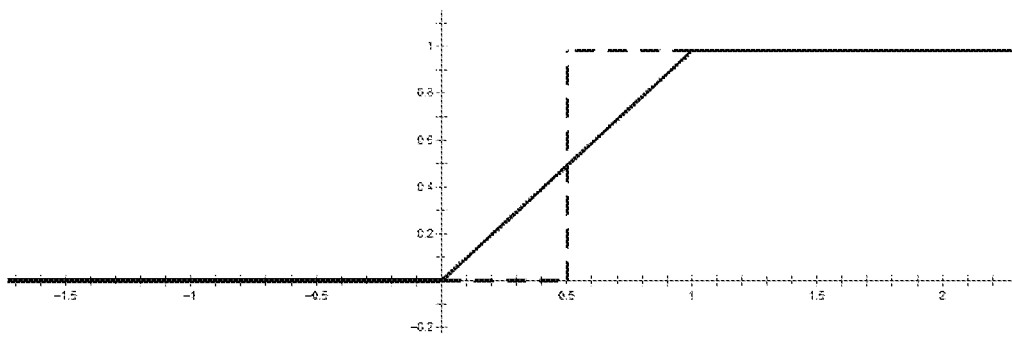


图 7

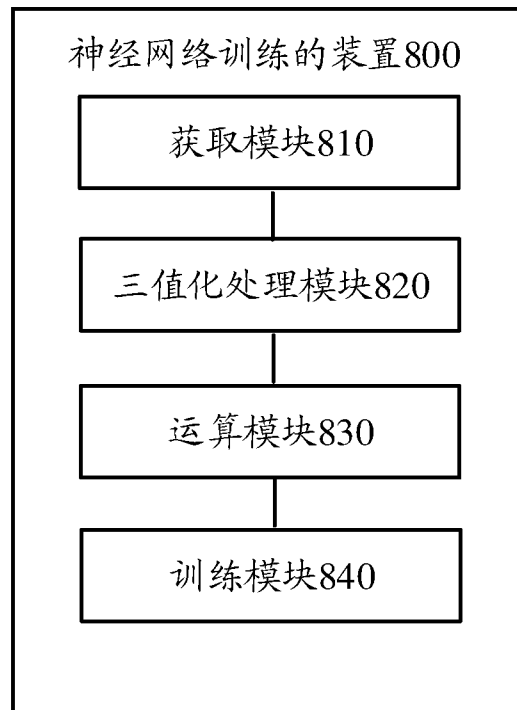


图8

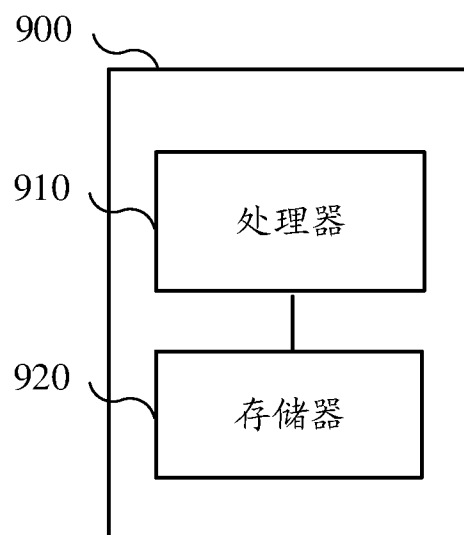


图9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/086547

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06N 3/08 (2006.01) i

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)

G06N; G06F

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

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

WPI; EPODOC; CNKI; CNPAT: 神经网络, 训练, 权重, 三值化, 稀疏项, 误差, neural w network, train, weight, three w value, sparsity, deviation

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106548127 A (PANASONIC INTELLECTUAL PROPERTY CORPORATION OF AMERICA) 29 March 2017 (29.03.2017), description, paragraphs [0095]-[0098] and [0126]-[0135], and figures 3A and 12	1-21
A	CN 104091081 A (INSTITUTE OF AUTOMATION, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 08 October 2014 (08.10.2014), entire document	1-21
A	CN 105701480 A (JIANGSU KING INTELLIGENT SYSTEM CO., LTD. et al.) 22 June 2016 (22.06.2016), entire document	1-21
A	US 9552549 B1 (GOOGLE INC.) 24 January 2017 (24.01.2017), entire document	1-21

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“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
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“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
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“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
“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)	“&” document member of the same patent family
“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	

Date of the actual completion of the international search 11 January 2018	Date of mailing of the international search report 24 February 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer ZHUANG, Yong Telephone No. (86-10) 53961296

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/086547

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 106548127 A	29 March 2017	US 2017083796 A1	23 March 2017
		EP 3144851 A1	22 March 2017
		JP 2017059207 A	23 March 2017
CN 104091081 A	08 October 2014	None	
CN 105701480 A	22 June 2016	None	
US 9552549 B1	24 January 2017	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/086547

A. 主题的分类 G06N 3/08 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06N; G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) WPI; EPDOC; CNKI; CNPAT: 神经网络, 训练, 权重, 三值化, 稀疏项, 误差, neural w network, train, weight, three w value, sparsity, deviation																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 106548127 A (松下电器美国知识产权公司) 2017年 3月 29日 (2017 - 03 - 29) 说明书第 [0095] - [0098], [0126] - [0135] 段, 图 3A, 12</td> <td>1-21</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104091081 A (中国科学院自动化研究所) 2014年 10月 8日 (2014 - 10 - 08) 全文</td> <td>1-21</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105701480 A (江苏科海智能系统有限公司 等) 2016年 6月 22日 (2016 - 06 - 22) 全文</td> <td>1-21</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 9552549 B1 (GOOGLE INC.) 2017年 1月 24日 (2017 - 01 - 24) 全文</td> <td>1-21</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 106548127 A (松下电器美国知识产权公司) 2017年 3月 29日 (2017 - 03 - 29) 说明书第 [0095] - [0098], [0126] - [0135] 段, 图 3A, 12	1-21	A	CN 104091081 A (中国科学院自动化研究所) 2014年 10月 8日 (2014 - 10 - 08) 全文	1-21	A	CN 105701480 A (江苏科海智能系统有限公司 等) 2016年 6月 22日 (2016 - 06 - 22) 全文	1-21	A	US 9552549 B1 (GOOGLE INC.) 2017年 1月 24日 (2017 - 01 - 24) 全文	1-21
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
A	CN 106548127 A (松下电器美国知识产权公司) 2017年 3月 29日 (2017 - 03 - 29) 说明书第 [0095] - [0098], [0126] - [0135] 段, 图 3A, 12	1-21															
A	CN 104091081 A (中国科学院自动化研究所) 2014年 10月 8日 (2014 - 10 - 08) 全文	1-21															
A	CN 105701480 A (江苏科海智能系统有限公司 等) 2016年 6月 22日 (2016 - 06 - 22) 全文	1-21															
A	US 9552549 B1 (GOOGLE INC.) 2017年 1月 24日 (2017 - 01 - 24) 全文	1-21															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																	
国际检索实际完成的日期 2018年 1月 11日		国际检索报告邮寄日期 2018年 2月 24日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		授权官员 庄湧 电话号码 (86-10) 53961296															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/086547

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	106548127	A	2017年 3月 29日	US	2017083796	A1	2017年 3月 23日
				EP	3144851	A1	2017年 3月 22日
				JP	2017059207	A	2017年 3月 23日
CN	104091081	A	2014年 10月 8日	无			
CN	105701480	A	2016年 6月 22日	无			
US	9552549	B1	2017年 1月 24日	无			