

(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
2021 年 9 月 16 日 (16.09.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/179409 A1

(51) 国际专利分类号:
G05D 1/02 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/086533

(22) 国际申请日: 2020 年 4 月 24 日 (24.04.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010157313.3 2020年3月9日 (09.03.2020) CN

(71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国江苏省镇江市京口区学府路
301号, Jiangsu 212013 (CN)。

(72) 发明人: 赵湛 (ZHAO, Zhan); 中国江苏省镇江市
京口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。
朱安静 (ZHU, Anjing); 中国江苏省镇江市京
口区学府路301号, Jiangsu 212013 (CN)。
路恩 (LU, En); 中国江苏省镇江市京口区学府
路301号, Jiangsu 212013 (CN)。
金明志 (JIN, Mingzhi); 中国江苏省镇江市京口区学府
路301号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 南京智造力知识产权代理有限公司
(NANJING IPZHI INTELLECTUAL PROPERTY

AGENCY CO., LTD.); 中国江苏省南京市江宁区
芝兰路18号4幢1202室, Jiangsu 211100 (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,
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 (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,
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)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条 (3))。

(54) Title: PATH PLANNING METHOD FOR MOVING ROBOT OF IRREGULAR SHAPE

(54) 发明名称: 一种非规则形状移动机器人的路径规划方法

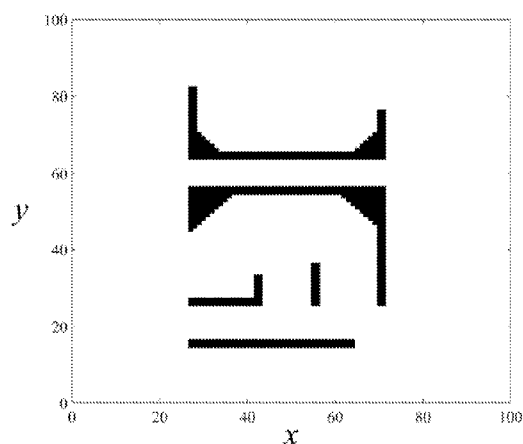


图 1

(57) Abstract: A path planning method for a moving robot of an irregular shape, comprising the following steps: evenly dividing a 2D workspace of the robot into a topological network T of workspaces, and conducting iterative computations of biological neural dynamics to construct a biological neural network S of the workspaces; forming a kernel matrix according to shape features of the moving robot; conducting convolution computation on the kernel matrix and the biological neural network of the workspaces to obtain a moving state matrix and a rotating state matrix of the robot at network nodes; performing iterative search step by step by using the initial position and direction of the robot in the workspace as initial conditions, and constructing a node tree Tree from an initial state to a target state; and performing reverse search on the node tree Tree to obtain a planned path of the robot. The robot may be of any irregular shape, the three degrees of freedom movement of the robot in a planar space has been considered, and in the convolution computation, a safety coefficient factor is added, the distance between the planned path and an obstacle is controlled, and the safety of the traveling path is adjusted.

(57) 摘要：一种非规则形状移动机器人的路径规划方法，包括以下步骤：将机器人的二维工作空间均匀划分成拓扑的工作空间网络T，并进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络S；根据移动机器人的形状特征构成核矩阵；将核矩阵与工作空间的生物神经网络进行卷积计算，获得机器人在网络节点的移动状态矩阵和转动状态矩阵；以机器人在工作空间初始位置和方向为初始条件，逐步迭代搜索，构建从初始状态到目标状态的节点树Tree；反向搜索节点树Tree，获得机器人的规划路径。机器人可以是任意非规则形状，考虑了机器人的在平面空间的3自由度运动，并且在卷积计算中增加安全系数因子，控制规划路径与障碍物之间的距离，调节行使路径的安全性。

一种非规则形状移动机器人的路径规划方法

技术领域

本发明属于移动机器人路径规划技术领域，具体涉及一种非规则形状移动机器人的路径规划方法。

背景技术

路径规划是移动机器人研究领域的一个核心问题，它的目标就是在工作环境中寻找一条连接机器人当前状态和目标状态的行使路线，并且避免与环境中的障碍物发生碰撞。目前，路径规划的研究方法包括细胞分解法、人工势场法以及各类智能算法等，但这些方法主要是针对单点机器人，即将机器人视为形状规则的单个元素，以机器人的尺寸对工作空间进行网络划分，在此基础上进行路径规划，路径规划算法中只考虑机器人的 2 自由度移动。实际情况，大多数机器人的形状是非规则的，非规则形状机器人的路径规划不仅需要考虑 2 自由度移动，还需要考虑其转动，例如，在某些复杂环境下，受到障碍物的影响，机器人只能作移动运动或在一定角度范围内转动，这些是路径规划中的重要约束。其次，工作空间中的障碍物有可能比机器人的尺寸要小，现在的解决办法是将障碍物形状进行拓展，即划分的工作空间网格内只要有障碍物，就将整个网格均视为障碍物，这就造成可能的行使路径被忽略了，即所谓的“path blocked”问题。此外，路径规划中，还需要考虑机器人行使的安全性，避免“too close”或者“too far”问题。

发明内容

针对上述技术问题，本发明提出了一种非规则形状移动机器人的路径规划方法，本发明是将生物神经网络和卷积神经网络相融合，可以控制路径安全性的规划方法，以解决复杂环境下、非规则形状移动机器人的路径规划难题。该方法将机器人的工作空间均匀划分成拓扑网络结构，并进行生物神经动力学迭代计算，采用迭代计算稳定后的网络节点函数值描述工作空间的环境信息；根据移动机器人的形状特征构成核矩阵，将核矩阵与工作空间的生物神经网络进行卷积计算，获得机器人在网络节点的移动状态矩阵和转动状态矩阵；以机器人在工作空间初始节点位置和方向为初始条件，逐步迭代搜索，构建从初始状态到目标状态的节点树，最后反向搜索节点树，获得机器人的规划路径。

路径规划中，机器人和目标均包括 x 、 y 坐标和方向 θ 三维状态参数，考虑了机器人的 2 自由度移动和 1 自由度转动运动，并且可以通过调节卷积计算中的安全系数因子，控制规划

路径与障碍物之间的距离，调节机器人行使路径的安全性。

本发明的技术方案是：一种非规则形状移动机器人的路径规划方法，包括以下步骤：

构建工作空间网络：将机器人的二维工作空间均匀划分成拓扑的工作空间网络 T ，并对工作空间网络 T 进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络 S ，生物神经网络 S 描述了整个工作空间的环境信息；

构建机器人形状核矩阵：根据移动机器人的形状特征构成核矩阵；

构建机器人的移动状态矩阵和转动状态矩阵：将核矩阵与工作空间的生物神经网络进行卷积计算，获得机器人在网络节点的移动状态矩阵和转动状态矩阵；

构建节点树 $Tree$ ：以机器人在工作空间初始位置和方向为初始条件，逐步迭代搜索，构建从初始状态到目标状态的节点树 $Tree$ ；

生成规划路径：反向搜索节点树 $Tree$ ，获得机器人的规划路径。

上述方案中，所述构建工作空间网络的步骤具体为：

将机器人的二维工作空间均匀划分成拓扑的工作空间网络 T ，工作空间网络 T 的每个节点包括自由空间和障碍物占据两个状态，自由空间的节点函数值设定为 0，障碍物占据的节点函数值设定为 1，工作空间网络 T 中的节点 T_i 会与周边 8 个节点相邻，将工作空间网络 T 进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络 S ，生物神经网络 S 上节点的函数值描述了该节点所在位置的环境信息，生物神经网络 S 则描述了整个工作空间的环境信息。

上述方案中，所述生物神经网络 S 迭代计算公式为：

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = -Ax_i + (B - x_i)\{[I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[I_j]^+\} - (D + x_i)[I_i]^- \quad \text{公式一}$$

公式一中， x_i 为第 i 个神经元节点 S_i 的在 t 时刻的函数值， A 、 B 、 D 为设定的非负恒定参数，且有 $A > B > D$ ， I_i 为生物神经网络节点 S_i 的外界激励，且有 $S_i^+ = [I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[I_j]^+$ 、 $S_i^-(t) = [I_i]^-$ ，障碍物占据节点的外界激励为 $I_i = E$ ，自由空间节点的外界激励为 $I_i = -E$ ，且有 $E \gg B$ ， I_j 为第 j 个相邻的神经元， $j = 1, 2 \dots 8$ ，公式一迭代算法中区分自由空间和障碍物的阈值函数定义为： $[a]^+ = \max\{a, 0\}$ 、 $[a]^- = \max\{-a, 0\}$ ，相邻神经元的连接权重 $w_{ij} = 1/d$ ， d 为第 i 和第 j 个神经元节点之间的距离， $k = 8$ 为周边 8 个相邻的神经元。

上述方案中，所述构建机器人形状核矩阵步骤具体为：

将移动机器人所占据区域扩展成规则矩形或正方形区域，并进行均匀划分，构成核矩阵 W ，矩阵的每个元素包括自由空间和机器人占据两个状态，自由空间的元素值设定为 0，机器人占据的元素值设定为 1，将机器人在工作空间内，间隔 45° 进行旋转，构建反映机器人 8

个方向的核矩阵 W^θ , $\theta=1, 2, \dots, 8$ 。

进一步的, 所述构建机器人的移动状态矩阵和转动状态矩阵的步骤具体为:

将 8 组反映机器人形状的核矩阵 W^θ 分别与生物神经网络 S 进行卷积计算, 得到 8 个一层卷积网络 $H^{1,\theta}$, $H^{1,\theta}$ 网络中每个节点的输出 $h^{1,\theta}(x, y)$ 表示机器人是否能够以 θ 方向放置于工作空间节点 (x, y) , 且 $h^{1,\theta}(x, y)=0$ 表示能够放置, $h^{1,\theta}(x, y)=-1$ 表示不能够放置;

构建 8 个 3×3 的核矩阵 M^θ , 用 M^θ 分别对一层卷积网络 $H^{1,\theta}$ 进行二次卷积计算, 得到 8 个二层卷积网络 $H^{2,\theta}$, $H^{2,\theta}$ 网络中每个节点的输出 $h^{2,\theta}(x, y)$ 表示机器人是否能够以 θ 方向从当前节点 (x, y) 行使进入相邻的节点, 且 $h^{2,\theta}(x, y)=0$ 表示能够行驶进入, $h^{2,\theta}(x, y)=-1$ 表示不能够行驶进入;

提取 $h^{2,\theta}(x, y)$, $\theta=1, 2, \dots, 8$, 构成一个 1×8 的移动状态矩阵 $TSM(x, y)$, 描述了机器人在当前节点的移动输出状态, 即是否能够从节点 (x, y) 行使进入相邻的 8 个节点的状态;

提取 $h^{1,\theta}(x, y)$, $\theta=1, 2, \dots, 8$, 构成一个 1×8 的转动状态矩阵 $RSM(x, y)$, 它由 '0' 或 '-1' 组成, 描述机器人在节点 (x, y) 的转动状态。

进一步的, 所述第一层卷积计算方法为:

$$h_{x,y}^{1,\theta} = f\left(\sum_{p,q \in s} -S_{p,q} * W^\theta + b\right) \quad \text{公式二}$$

公式二中, s 为核矩阵 W^θ 所在生物神经网络 S 中所占据的子空间集合, '*' 代表卷积计算, b 表示安全系数, 采用符号激活函数 $f(\cdot)$, 定义为 $f(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$ 。

上述方案中, 所述构建节点树的步骤具体为:

以机器人的初始状态, 搜索机器人能够进入的相邻神经元信息, 构成一组节点信息集合 P_{step} , 搜索步长 $\text{step} = \text{step} + 1$, 判断目标信息是否属于信息集合 P_{step} , 如果目标信息属于信息集合 P_{step} , 则停止搜索, 如果目标信息不属于信息集合 P_{step} , 则更新已经搜索的节点树 Tree , 并将节点信息集合 P_{step} 设定为当前状态, 进行下一步搜索, 直到搜索到目标信息为止;

由每一步长的节点集合 P_{step} , $\text{step}=1, 2, \dots, p$, 构成一个从初始状态到目标状态的节点树 Tree 。

上述方案中, 所述生成规划路径具体步骤为:

根据所述节点树 Tree , 输入机器人的初始位置 (x_0, y_0) 和方向 θ_0 , 输入目标位置 (x_p, y_p) 和方向 θ_p ;

从目标信息节点出发, 搜索与之相连的父节点, 构成父节点集合, 确定路径节点, 更新

路径节点 Path，然后进行循环搜索，直到步长 $step=1$ ，由每一步长 $step=1, 2, \dots, p$ 搜索到的节点构成连接目标位置和初始位置的路径节点 Path，即规划路径。

进一步的，所述确定路径节点的确定具体为：如果父节点集合中有水平或垂直相连的父节点，则将其作为机器人行走路径节点，如果没有，则寻找与机器人当前方向转动角度较小的父节点，并将其作为机器人行走路径节点。

上述方案中，所述生物神经网络 S 的节点所描述的实际空间与反映机器人形状的核心矩阵 W^θ 的节点所描述的实际空间相等，机器人放置于生物神经网络 S 中所占据的是一个与核心矩阵 W 大小相等的子网络，将反映机器人形状的核心矩阵 W^θ 放置于生物神经网络 S 中，能够保证 W^θ 与 S 的节点位置一一对应。

与现有技术相比，本发明的有益效果是：本发明将生物神经网络和卷积神经网络融入路径规划中，提出一种非规则形状移动机器人的路径规划方法，通过构建核心矩阵描述机器人的形状特征，用于任意非规则形状的移动机器人在复杂工作空间下的安全路径规划；由于工作空间划分网络的尺寸远小于机器人的尺寸，可以很好的描述小障碍物特征，解决密集散点障碍工作环境下“path blocked”难题；只需要改变卷积计算中安全系数，就可实现规划路径与障碍物的距离的调节，方便地控制规划路径的安全性。

附图说明

图 1 是本发明一实施方式的机器人的工作空间划分示意图。

图 2 是本发明一实施方式的工作空间神经元节点连接示意图。

图 3 是本发明一实施方式的工作空间的生物神经网络构建示意图。

图 4 是本发明一实施方式的机器人形状核心矩阵构建示意图。

图 5 是本发明一实施方式的卷积神经网络计算示意图。

图 6 是本发明一实施方式的二次卷积计算核心矩阵示意图。

图 7 是本发明一实施方式的节点树的构建流程图。

图 8 是本发明一实施方式的生成规划路径的流程图。

图 9 是本发明一实施方式的在 U 型障碍工作环境下的规划路径图。

图 10 是本发明一实施方式的在密集散点障碍工作环境下的规划路径图。

具体实施方式

下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

一种非规则形状移动机器人的路径规划方法，包括以下步骤：

构建工作空间网络：将机器人的二维工作空间均匀划分成拓扑的工作空间网络 T ，并对工作空间网络 T 进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络 S ，生物神经网络 S 描述了整个工作空间的环境信息；

构建机器人形状核矩阵：根据移动机器人的形状特征构成核矩阵；

构建机器人的移动状态矩阵和转动状态矩阵：将核矩阵与工作空间的生物神经网络进行卷积计算，获得机器人在网络节点的移动状态矩阵和转动状态矩阵；

构建节点树 $Tree$ ：以机器人在工作空间初始位置和方向为初始条件，逐步迭代搜索，构建从初始状态到目标状态的节点树 $Tree$ ；

生成规划路径：最后反向搜索节点树 $Tree$ ，获得机器人的规划路径。

所述构建工作空间网络的步骤具体为：

如图 1 所示，将移动机器人的二维工作空间沿 x 和 y 方向均匀划分成拓扑的工作空间网络 T ，图 1 中划分成 100×100 的网络结构，工作空间网络 T 的每个节点 $T(x, y)$ 包括自由空间和障碍物占据两个状态，自由空间如图 1 中白色区域所示，自由空间的节点函数值设定为 $T(x, y) = 0$ ，障碍物占据如图 1 中黑色区域所示，障碍物占据的节点函数值设定为 $T(x, y) = 1$ 。

如图 2 所示，工作空间网络 T 中的节点 T_i 的坐标为 (x, y) ，节点 T_i 会与周边 8 个节点相邻 T_j ， $j=1, 2, \dots, 8$ 。

将工作空间网络 T 进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络 S ，计算公式为

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = -Ax_i + (B - x_i)\{[I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[I_j]^+\} - (D + x_i)[I_i]^- \quad \text{公式一}$$

公式一中， x_i 为第 i 个神经元节点 S_i 的在 t 时刻的函数值， A 、 B 、 D 为设定的非负恒定参数，且有 $A > B > D$ ， I_i 为生物神经网络节点 S_i 的外界激励，且有 $S_i^+ = [I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[I_j]^+$ 、 $S_i^-(t) = [I_i]^-$ ，障碍物占据节点的外界激励为 $I_i = E$ ，自由空间节点的外界激励为 $I_i = -E$ ，且有 $E \gg B$ ， I_j 为第 j 个相邻的神经元， $j=1, 2, \dots, 8$ ，式中的阈值函数定义为： $[a]^+ = \max\{a, 0\}$ 、 $[a]^- = \max\{-a, 0\}$ ，相邻神经元的连接权重 $w_{ij} = 1/d$ ， d 为第 i 和第 j 个神经元节点之间的距离， $k=8$ 为周边 8 个相邻的神经元。根据 $E \gg B$ ， $A > B$ ， $B > D$ 设定参数 A 、 B 、 D 、 E ，可以使生物神经网络 S 中，障碍物占据节点的函数值远大于自由空间节点的函数值，两者之间形成连续的梯度过渡，使得自由空间节点的函数值随着与障碍物距离的增大而逐步减小。

当设定参数 $A=10$ 、 $B=1$ 、 $D=0$ 、 $E=50$ 时，迭代计算稳定后得到的工作空间生物神经网络 S 如图 3 所示。

生物神经网络 S 上节点的函数值描述了该节点所在位置的环境信息，生物神经网络 S 则描述了整个工作空间的环境信息。

所述构建机器人形状核矩阵的步骤具体为：

移动机器人的形状可以是任意的；

假设为“箭头”形状移动机器人，将移动机器人所占据区域扩展成规则的矩形或正方形区域，并进行均匀划分，构成核矩阵 W，图 4 中划分为 9×9 的正方形矩阵，矩阵的每个元素 W(m, n) 包括自由空间和机器人占据两个状态，自由空间的元素值设定为 W(m, n) = 0，机器人占据的元素值设定为 W(m, n) = 1。

将机器人在工作空间内，间隔 45° 进行旋转，构建反映机器人 8 个方向的核矩阵 W^θ ， θ 表示机器人前进方向， $\theta=1, 2, \dots, 8$ ，如图 4 所示。

构建的生物神经网络 S 的节点所描述的实际空间应该与机器人形状核矩阵 W^θ 的节点所描述的实际空间相等。

机器人放置于生物神经网络 S 中所占据的是一个与核矩阵 W 大小相等的子网络。

将机器人形状核矩阵 W^θ 放置于生物神经网络 S 中，能够保证 W^θ 与 S 的节点位置一一对应。

所述构建机器人的移动状态矩阵和转动状态矩阵的步骤具体为：

卷积神经网络计算结构参阅图 5，构建的核矩阵参阅图 6。

卷积神经网络计算结构如图 5 所示，将 8 组反映机器人形状的核矩阵 W^θ 分别与生物神经网络 S 进行卷积计算，得到 8 个一层卷积网络 $H^{1,\theta}$ ，卷积计算方法为

$$h_{x,y}^{1,\theta} = f\left(\sum_{p,q \in s} -S_{p,q} * W^\theta + b\right) \quad \text{公式二}$$

公式中，s 为核矩阵 W^θ 所在生物神经网络 S 中所占据的子空间集合， $S_{p,q}$ 为 s 的子空间，‘*’代表卷积计算，b 表示安全系数，采用符号激活函数 $f(\cdot)$ ，定

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad \text{公式三}$$

卷积计算后， $H^{1,\theta}$ 网络中每个节点的输出 $h^{1,\theta}(x, y)$ 表示机器人是否能够以 θ 方向放置于工作空间节点 (x, y)，且 $h^{1,\theta}(x, y) = 0$ 表示能够放置， $h^{1,\theta}(x, y) = -1$ 表示不能够放置。

如图 6 所示，构建 8 个 3×3 的核矩阵 M^θ ， $\theta=1, 2, \dots, 8$ 。

用 M^θ 分别对一层卷积网络 $H^{1,\theta}$ 进行二次卷积计算，得到 8 个二层卷积网络 $H^{2,\theta}$ ，卷积计算中安全系数 b 设定为 0。

二次卷积 $H^{2,\theta}$ 网络中每个节点的输出 $h^{2,\theta}(x, y)$ 表示机器人是否能够以 θ 方向从当前节

点 (x, y) 行使进入相邻的节点, 且 $h^{2,\theta}(x, y) = 0$ 表示能够行驶进入, $h^{2,\theta}(x, y) = -1$ 表示不能够行驶进入。

提取 $h^{2,\theta}(x, y)$, $\theta=1, 2, \dots, 8$, 构成一个 1×8 的移动状态矩阵 $TSM(x, y)$, 它由‘0’或‘-1’组成, 描述了机器人在当前节点的移动输出状态, 即是否能够从节点 (x, y) 行使进入相邻的 8 个节点的状态。

例如, $TSM(x, y) = [0, -1, -1, 0, 0, 0, -1, 0]$, 表示机器人可以从节点 (x, y) 行使进入相邻 5 个节点 $(x+1, y)$ 、 $(x+1, y-1)$ 、 $(x, y-1)$ 、 $(x-1, y-1)$ 和 $(x-1, y+1)$ 。

提取 $h^{1,\theta}(x, y)$, $\theta=1, 2, \dots, 8$, 构成一个 1×8 的转动状态矩阵 $RSM(x, y)$, 它由‘0’或‘-1’组成, 描述机器人在节点 (x, y) 的转动状态。

例如, $RSM(x, y) = [-1, -1, -1, 0, 0, 0, -1, 0]$, 表示机器人在节点 (i, j) 位置, 可以在 $\theta=4, 5$, 和 6 范围内转动。

所述构建节点树的步骤具体为:

如图 7 所示, 首先进行参数初始化: 构建机器人工作空间信息, 构建工作空间网络 T ; 根据移动机器人的形状构建 8 个核矩阵 W^θ ; 输入机器人的初始位置 (x_0, y_0) 和方向 θ_0 , 输入目标位置 (x_p, y_p) 和方向 θ_p ; 设定规划路径的安全系数 b ; 步长 $step=0$ 。

其次, 根据工作空间网络 T 计算工作空间的生物神经网络 S ; 通过卷积计算, 获得生物神经网络 S 上机器人在每个节点的移动状态矩阵 TSM 和转动状态矩阵 RSM 。

然后, 进入循环搜索程序。

以机器人的初始状态, 搜索机器人能够进入的相邻神经元信息, 构成一组节点信息集合 P_{step} , 搜索步长 $step=step+1$;

判断目标信息是否属于信息集合 P_{step} , 如果目标信息属于信息集合 P_{step} , 则停止搜索; 如果目标信息不属于信息集合 P_{step} , 则更新已经搜索的节点树 $Tree$, 并将节点信息集合 P_{step} 设定为当前状态, 进行下一步搜索, 直到搜索到目标信息为止。

节点信息集合 P_{step} 包括机器人的位置和方向, 只有当它们与目标位置 (x_p, y_p) 和方向 θ_p 均相等时, 才说明机器人到达目标。

由每一步长的节点集合 P_{step} , $step=1, 2, \dots, p$, 构成一个从初始状态到目标状态的节点树 $Tree$ 。

搜索完成后, 程序返回构建的搜索节点树 $Tree$ 。

所述生成规划路径具体步骤为:

如图 8 所示: 首先, 输入已经建立的搜索树 $Tree$, 输入机器人的初始位置 (x_0, y_0) 和方向 θ_0 , 输入目标位置 (x_p, y_p) 和方向 θ_p ; 步长 $step=step-1$;

其次，从目标信息节点出发，搜索与之相连的父节点，构成父节点集合；如果父节点集合中有水平或垂直相连的父节点，则将其作为机器人行走路径节点，如果没有，则寻找与机器人当前方向转动角度较小的父节点，并将其作为机器人行走路径节点。

将上一步确定的路径节点作为当前节点，更新路径节点 Path，然后进行循环搜索，直到步长 $step=1$ 。

由每一步长 $step=1, 2, \dots, p$ 搜索到的节点增加到路径节点 Path，即逐步更新规划路径 Path。

程序返回连接目标位置和初始位置的路径节点 Path，即规划路径。

节点树 Tree 的构建过程中，只需要通过设定第一层卷积计算中的安全系数 b ，可以控制路径与障碍物之间的距离，且随着 b 的增大，路径与障碍物之间的距离随之增加，以保证机器人行使的安全性。

规划得到的路径是在一定安全系数 b 情况下的最短路径。

U 型障碍工作环境下的规划路径：

如图 9 所示，图 9 中箭头为前进方向，非规则形状移动机器人的路径规划考虑了机器人在工作空间内的 3 自由度运动，即 2 自由度平移和 1 自由度转动，机器人需要同时满足到达目标位置 (x_p, y_p) 和方向 θ_p ，才能生成路径。

可以通过设定安全系数 b ，改变所规划的路径，图 9 中， $b_3 > b_2 > b_1$ ，可见随着安全系数的增大，所规划的路径也会随之作改变，规划的路径与障碍物的距离随之增大，以保证机器人运动的安全性。

密集散点障碍工作环境下的规划路：

如图 10 所示，本发明中，构建的生物神经网络 S 的节点所描述的实际空间与机器人形状的核矩阵 W^0 的节点所描述的实际空间相等，机器人在 S 中是占据一个子网络，且 W^0 与 S 的节点位置一一对应。这就使得生物神经网络 S 的节点所描述的实际空间要远小于机器人的尺寸，它可以更好的描述小障碍环境，图 10 给出了在密集散点障碍工作环境下的规划路径结果，通过设定安全系数 b ， $b_2 > b_1$ ，也可以调节路径与障碍物的距离。

可见本发明是用于任意非规则形状的移动机器人在复杂工作空间下的安全路径规划，将机器人的工作空间均匀划分成拓扑网络结构，并进行生物神经动力学迭代计算，采用迭代计算稳定后的网络节点函数值描述工作空间的环境信息；根据移动机器人的形状特征构成核矩阵，将核矩阵与工作空间的生物神经网络进行卷积计算，获得机器人在网络节点的移动状态矩阵和转动状态矩阵；以机器人在工作空间初始位置和方向为初始条件，逐步迭代搜索，构建从初始状态到目标状态的节点树，最后反向搜索节点树，获得机器人的规划路径。该方法

中，机器人可以是任意非规则形状，考虑了机器人的在平面空间的 3 自由度运动，并且在卷积计算中增加安全系数因子，控制规划路径与障碍物之间的距离，解决密集散点障碍工作环境下“path blocked”难题；只需要改变卷积计算中安全系数，就可实现规划路径与障碍物的距离的调节，方便地控制规划路径的安全性。

上文所列出的一系列的详细说明仅仅是针对本发明的可行性实施例的具体说明，它们并非用以限制本发明的保护范围，凡未脱离本发明技艺精神所作的等效实施例或变更均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种非规则形状移动机器人的路径规划方法，其特征在于，包括以下步骤：

构建工作空间网络：将机器人的二维工作空间均匀划分成拓扑的工作空间网络 T，并对工作空间网络 T 进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络 S，生物神经网络 S 描述了整个工作空间的环境信息；

构建机器人形状核矩阵：根据移动机器人的形状特征构成核矩阵；

构建机器人的移动状态矩阵和转动状态矩阵：将核矩阵与工作空间的生物神经网络进行卷积计算，获得机器人在网络节点的移动状态矩阵和转动状态矩阵；

构建节点树 Tree：以机器人在工作空间初始位置和方向为初始条件，逐步迭代搜索，构建从初始状态到目标状态的节点树 Tree；

生成规划路径：反向搜索节点树 Tree，获得机器人的规划路径。

2. 根据权利要求 1 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法，其特征在于，所述构建工作空间网络的步骤具体为：

将机器人的二维工作空间均匀划分成拓扑的工作空间网络 T，工作空间网络 T 的每个节点包括自由空间和障碍物占据两个状态，自由空间的节点函数值设定为 0，障碍物占据的节点函数值设定为 1，工作空间网络 T 中的节点 T_i 会与周边 8 个节点相邻，将工作空间网络 T 进行生物神经动力学迭代计算，构成工作空间的生物神经网络 S，生物神经网络 S 上节点的函数值描述了该节点所在位置的环境信息，生物神经网络 S 则描述了整个工作空间的环境信息。

3. 根据权利要求 2 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法，其特征在于，所述生物神经网络 S 迭代计算公式为：

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = -Ax_i + (B - x_i)\{[I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[I_j]^+\} - (D + x_i)[I_i]^- \quad \text{公式一}$$

公式一中， x_i 为第 i 个神经元节点 S_i 的在 t 时刻的函数值， A 、 B 、 D 为设定的非负恒定参数，且有 $A > B > D$ ， I_i 为生物神经网络节点 S_i 的外界激励，且有 $S_i^+ = [I_i]^+ + \sum_{j=1}^k w_{ij}[I_j]^+$ 、 $S_i^-(t) = [I_i]^-$ ，障碍物占据节点的外界激励为 $I_i = E$ ，自由空间节点的外界激励为 $I_i = -E$ ，且有 $E \gg B$ ， I_j 为第 j 个相邻的神经元， $j = 1, 2, \dots, 8$ ，式一中的阈值函数定义为： $[a]^+ = \max\{a, 0\}$ 、 $[a]^- = \max\{-a, 0\}$ ，相邻神经元的连接权重 $w_{ij} = 1/d$ ， d 为第 i 和第 j 个神经元节点之间的距离， $k = 8$ 为周边 8 个相邻的神经元。

4. 根据权利要求 1 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法，其特征在于，所述构建机器人形状核矩阵步骤具体为：

将移动机器人所占据区域扩展成规则矩形或正方形区域，并进行均匀划分，构成核矩阵

W, 矩阵的每个元素包括自由空间和机器人占据两个状态, 自由空间的元素值设定为 0, 机器人占据的元素值设定为 1, 将机器人在工作空间内, 间隔 45° 进行旋转, 构建反映机器人 8 个方向的核矩阵 W^θ , $\theta=1, 2, \dots, 8$ 。

5. 根据权利要求 4 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法, 其特征在于, 所述构建机器人的移动状态矩阵和转动状态矩阵的步骤具体为:

将 8 组反映机器人形状的核矩阵 W^θ 分别与生物神经网络 S 进行卷积计算, 得到 8 个一层卷积网络 $H^{1,\theta}$, $H^{1,\theta}$ 网络中每个节点的输出 $h^{1,\theta}(x, y)$ 表示机器人是否能够以 θ 方向放置于工作空间节点 (x, y) , 且 $h^{1,\theta}(x, y)=0$ 表示能够放置, $h^{1,\theta}(x, y)=-1$ 表示不能够放置;

构建 8 个 3×3 的核矩阵 M^θ , 用 M^θ 分别对一层卷积网络 $H^{1,\theta}$ 进行二次卷积计算, 得到 8 个二层卷积网络 $H^{2,\theta}$, $H^{2,\theta}$ 网络中每个节点的输出 $h^{2,\theta}(x, y)$ 表示机器人是否能够以 θ 方向从当前节点 (x, y) 行使进入相邻的节点, 且 $h^{2,\theta}(x, y)=0$ 表示能够行驶进入, $h^{2,\theta}(x, y)=-1$ 表示不能够行驶进入;

提取 $h^{2,\theta}(x, y)$, $\theta=1, 2, \dots, 8$, 构成一个 1×8 的移动状态矩阵 TSM (x, y) , 描述了机器人在当前节点的移动输出状态, 即是否能够从节点 (x, y) 行使进入相邻的 8 个节点的状态;

提取 $h^{1,\theta}(x, y)$, $\theta=1, 2, \dots, 8$, 构成一个 1×8 的转动状态矩阵 RSM (x, y) , 它由‘0’或‘-1’组成, 描述机器人在节点 (x, y) 的转动状态。

6. 根据权利要求 5 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法, 其特征在于, 所述第一层卷积计算方法为:

$$h_{x,y}^{1,\theta} = f\left(\sum_{p,q \in s} -S_{p,q} * W^\theta + b\right) \quad \text{公式二}$$

公式二中, s 为核矩阵 W^θ 所在生物神经网络 S 中所占据的子空间集合, ‘*’代表卷积计算, b 表示安全系数, 采用符号激活函数 $f(\cdot)$, 定义为 $f(x) = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$ 。

7. 根据权利要求 1 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法, 其特征在于, 所述构建节点树的步骤具体为:

以机器人的初始状态, 搜索机器人能够进入的相邻神经元信息, 构成一组节点信息集合 P_{step} , 搜索步长 $\text{step} = \text{step} + 1$, 判断目标信息是否属于信息集合 P_{step} , 如果目标信息属于信息集合 P_{step} , 则停止搜索, 如果目标信息不属于信息集合 P_{step} , 则更新已经搜索的节点树 Tree, 并将节点信息集合 P_{step} 设定为当前状态, 进行下一步搜索, 直到搜索到目标信息为止;

由每一步长的节点集合 P_{step} , $\text{step} = 1, 2, \dots, p$, 构成一个从初始状态到目标状态的节点树 Tree。

8.根据权利要求 1 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法,其特征在于,所述生成规划路径具体步骤为:

根据所述节点树 Tree,输入机器人的初始位置 (x_0, y_0) 和方向 θ_0 ,输入目标位置 (x_p, y_p) 和方向 θ_p ;

从目标信息节点出发,搜索与之相连的父节点,构成父节点集合,确定路径节点,更新路径节点 Path,然后进行循环搜索,直到步长 $\text{step}=1$,由每一步长 $\text{step}=1, 2, \dots, p$ 搜索到的节点构成连接目标位置和初始位置的路径节点 Path,即规划路径。

9. 根据权利要求 8 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法,其特征在于,所述确定路径节点的确定具体为:如果父节点集合中有水平或垂直相连的父节点,则将其作为机器人行走路径节点,如果没有,则寻找与机器人当前方向转动角度较小的父节点,并将其作为机器人行走路径节点。

10. 根据权利要求 1 所述的非规则形状移动机器人的路径规划方法,其特征在于,所述生物神经网络 S 的节点所描述的实际空间与反映机器人形状的核矩阵 $\mathbf{W}^\theta$ 的节点所描述的实际空间相等,机器人放置于生物神经网络 S 中所占据的是一个与核矩阵 $\mathbf{W}$ 大小相等的子网络,将反映机器人形状的核矩阵 $\mathbf{W}^\theta$ 放置于生物神经网络 S 中,能够保证 $\mathbf{W}^\theta$ 与 S 的节点位置一一对应。

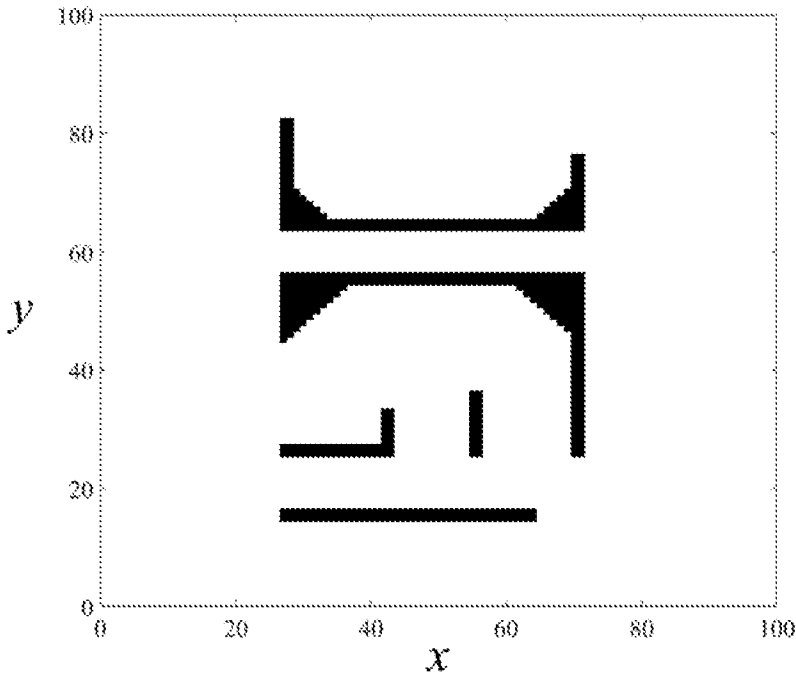


图 1

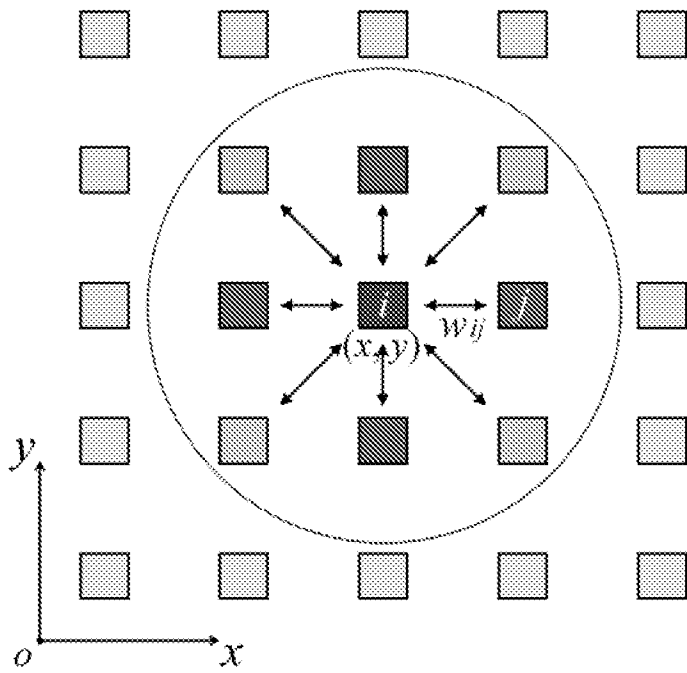


图 2

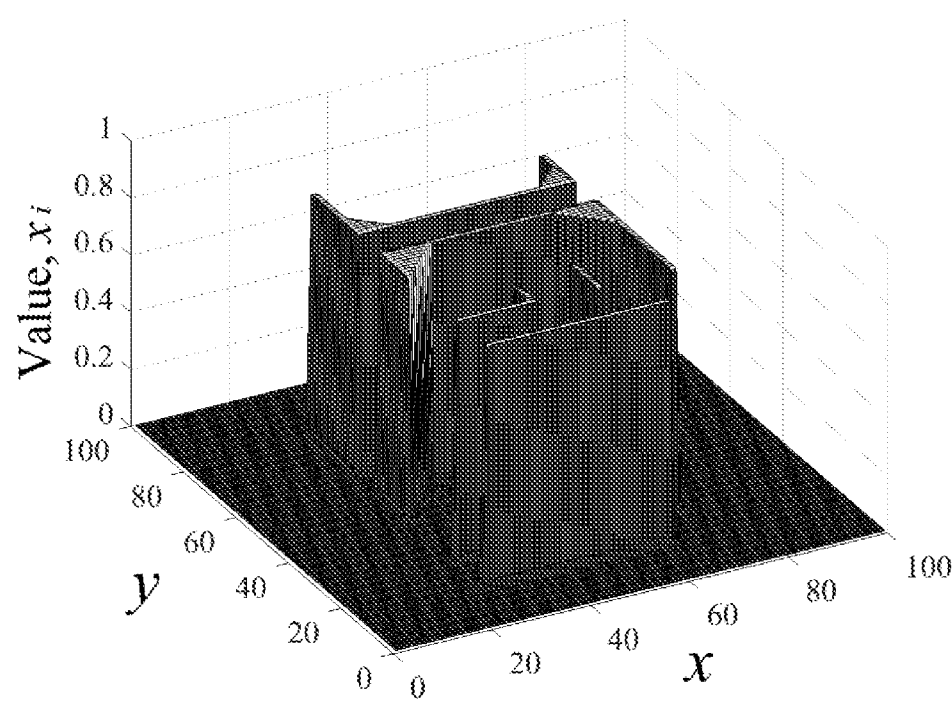


图 3

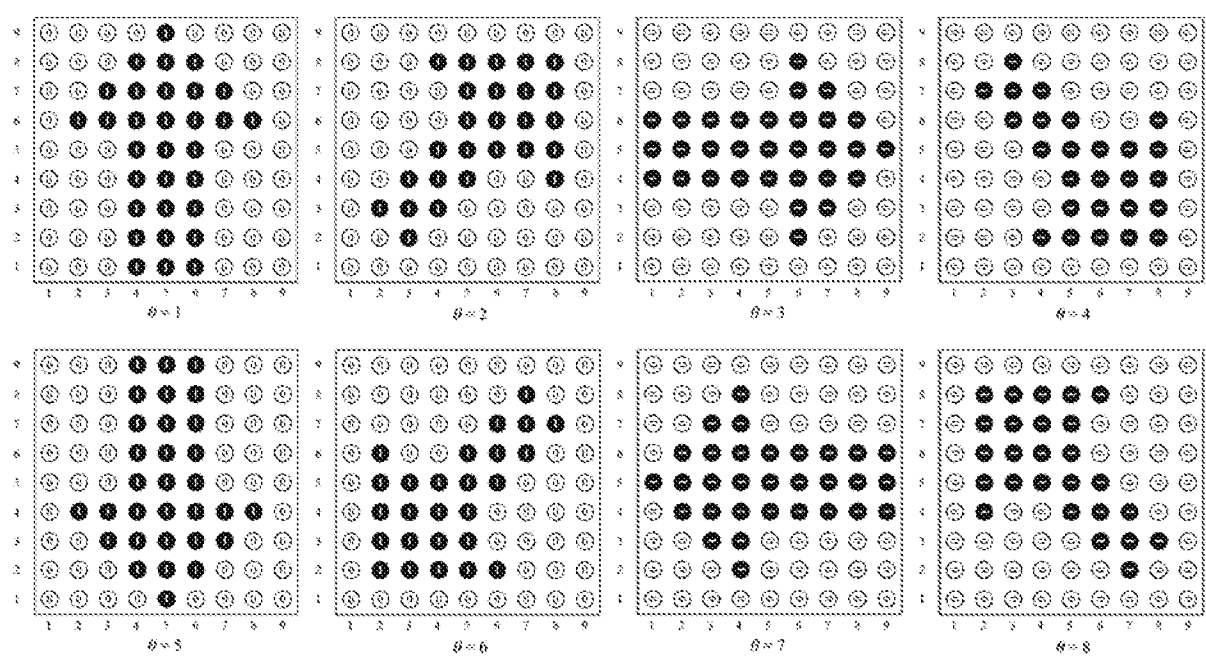


图 4

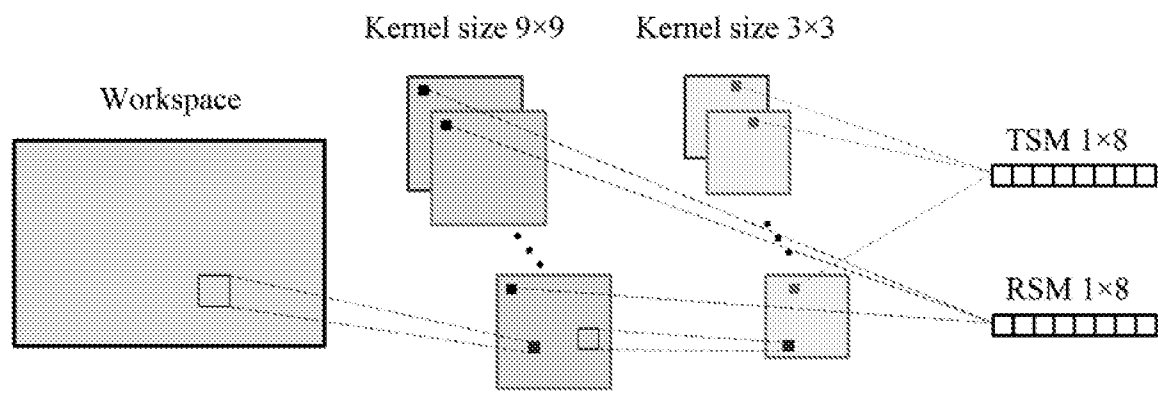


图 5

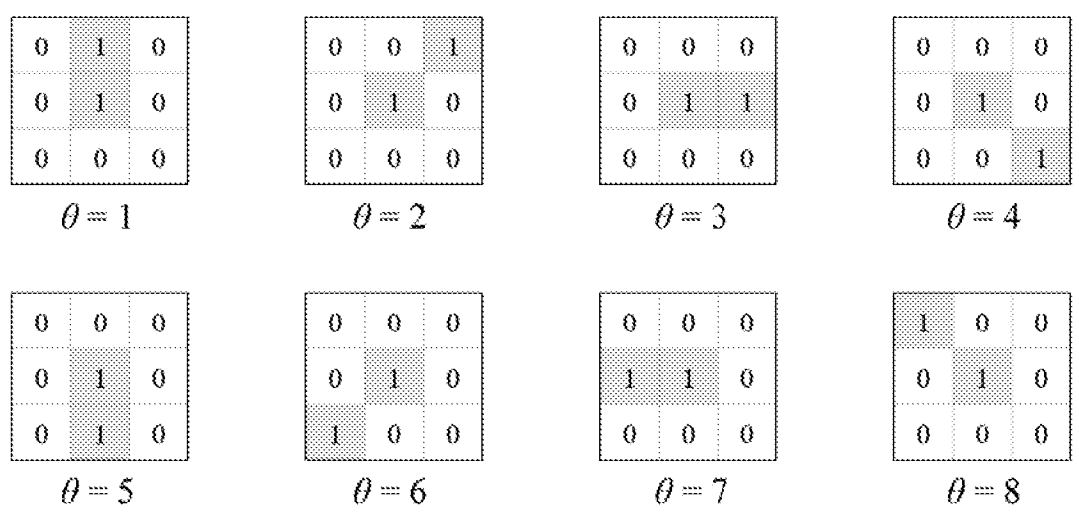


图 6

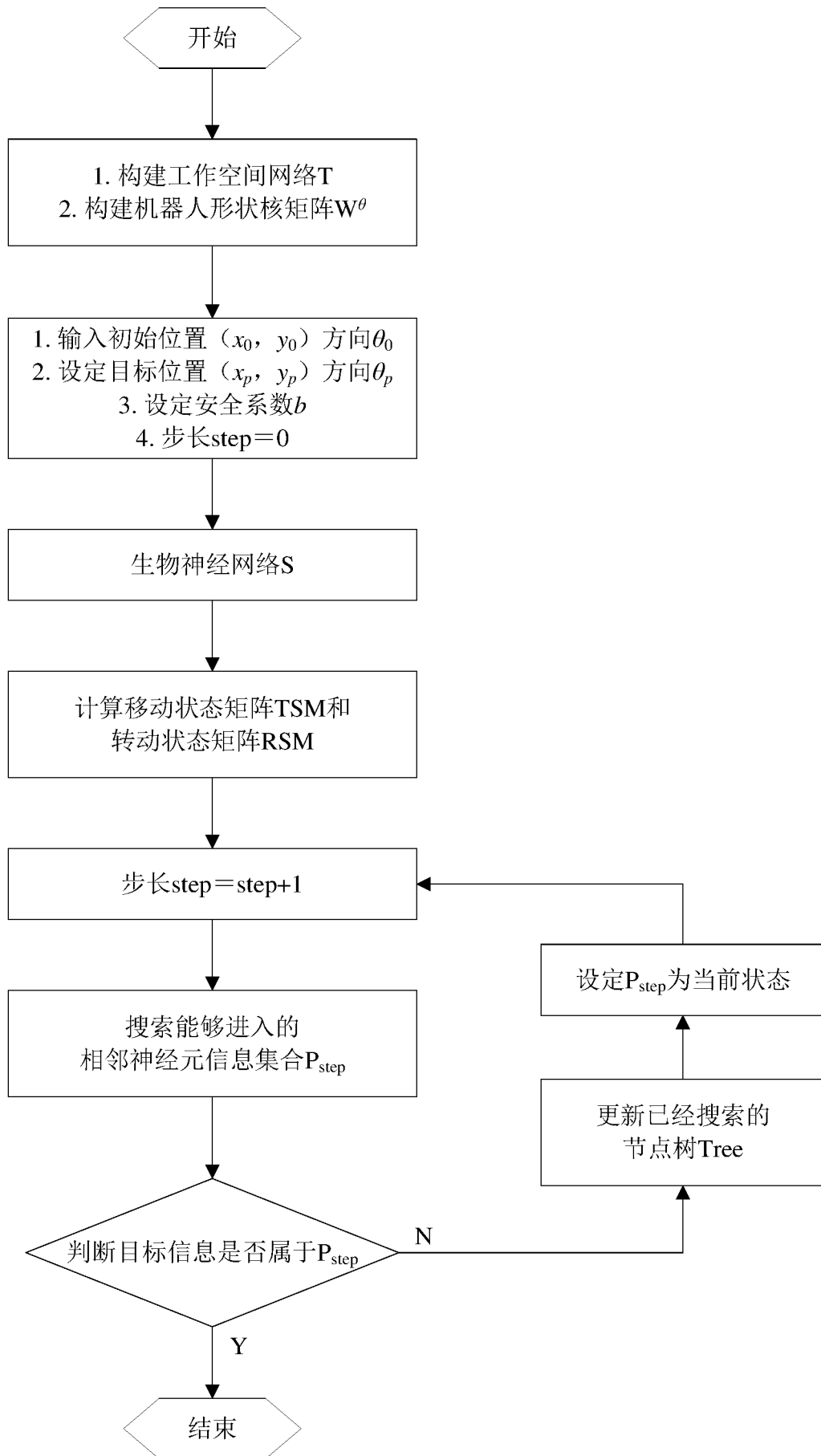


图 7

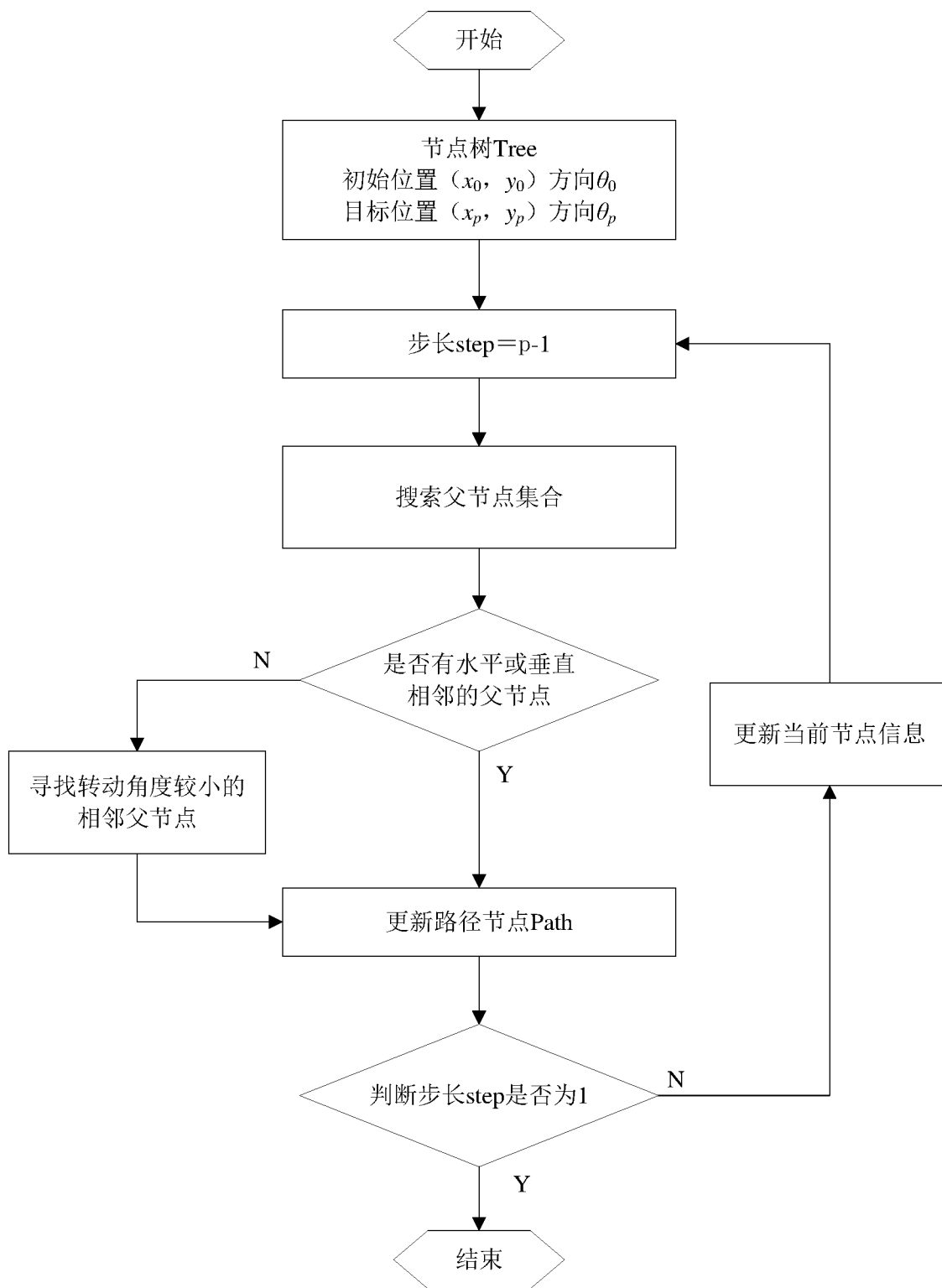


图 8

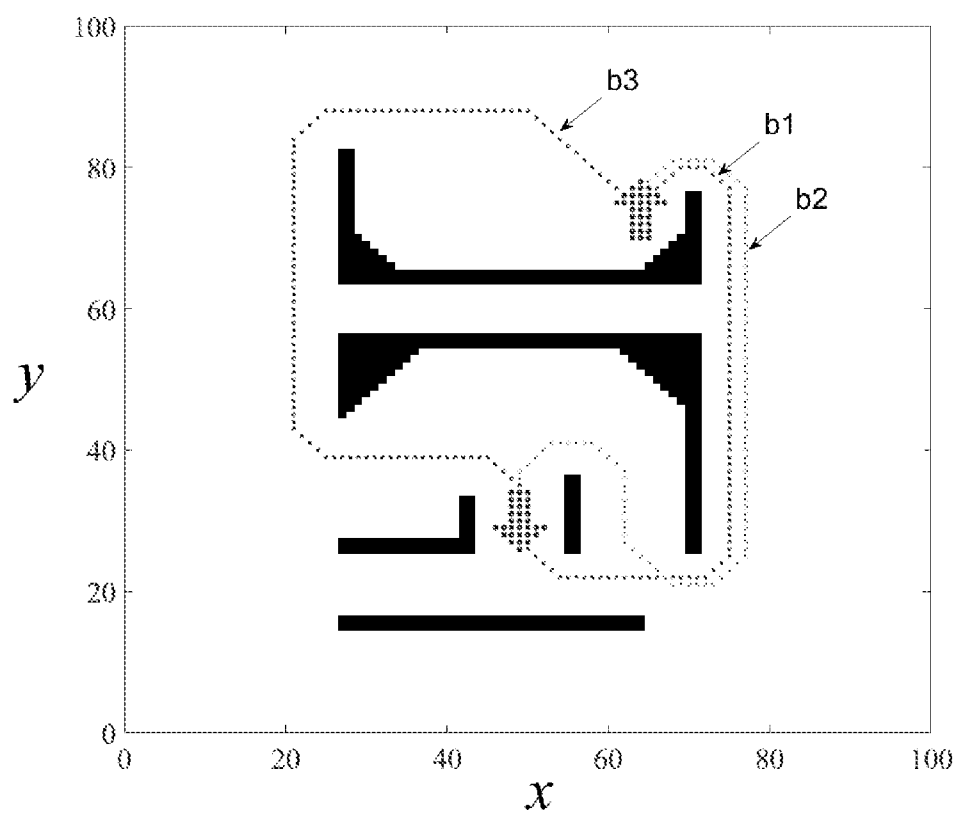


图 9

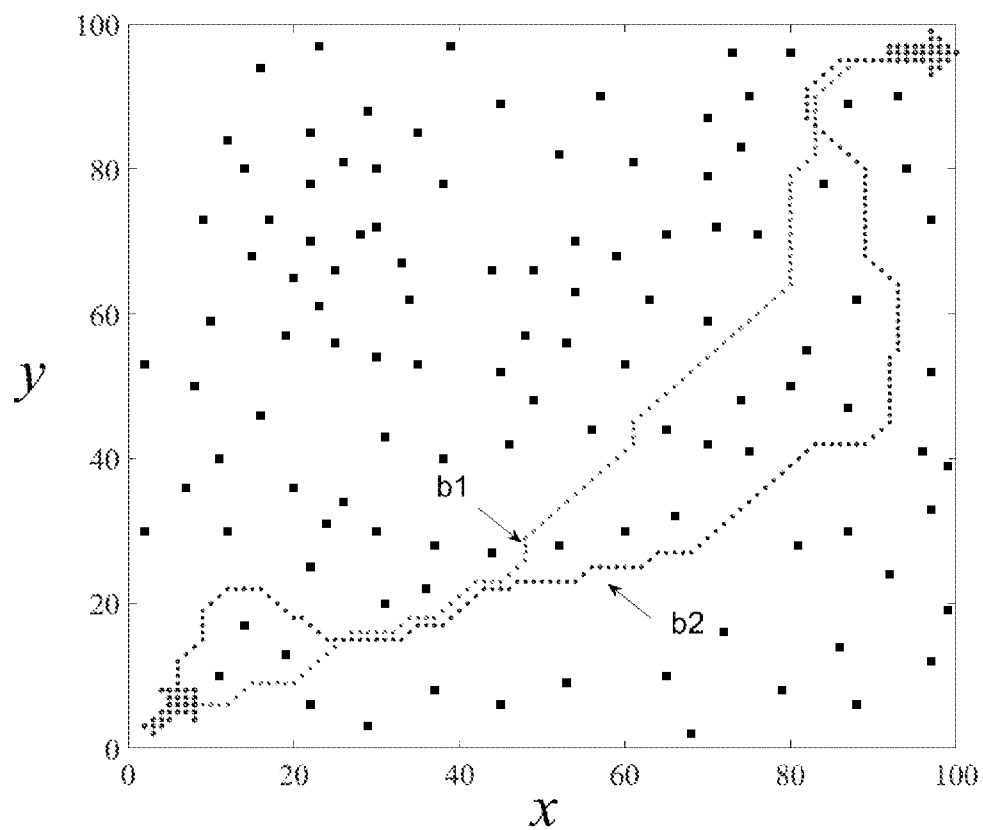


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/086533

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05D 1/02(2020.01)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)

G05D,G01C

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)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 机器人, 路径, 路线, 规划, 非规则, 不规则, 复杂, 异形, 形状, 核矩阵, 节点树, 反向, 神经网络, robot, auto+, path+, rout+, track+, abnorm+, figure, kernel, matrix, node?, tree, neural, network

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106843211 A (DONGHUA UNIVERSITY) 13 June 2017 (2017-06-13) description, paragraphs [0053]-[0079], and figures 1-2	1-10
A	CN 110057362 A (ANHUI UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 26 July 2019 (2019-07-26) entire document	1-10
A	CN 110426044 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 08 November 2019 (2019-11-08) entire document	1-10
A	CN 104050390 A (SOUTHWEST JIAOTONG UNIVERSITY) 17 September 2014 (2014-09-17) entire document	1-10
A	CN 109839110 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 04 June 2019 (2019-06-04) entire document	1-10
A	US 2011004581 A1 (PALO ALTO RESEARCH CENTER INCORPORATED) 06 January 2011 (2011-01-06) entire document	1-10



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

10 November 2020

Date of mailing of the international search report

26 November 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/086533

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106843211	A	13 June 2017	CN	106843211	B	08 November 2019
CN	110057362	A	26 July 2019	None			
CN	110426044	A	08 November 2019	None			
CN	104050390	A	17 September 2014	CN	104050390	B	17 May 2017
CN	109839110	A	04 June 2019	CN	109839110	B	24 July 2020
US	2011004581	A1	06 January 2011	US	2012246193	A1	27 September 2012
				EP	2270677	A2	05 January 2011
				JP	2011014139	A	20 January 2011
				JP	5552382	B2	16 July 2014
				US	9460053	B2	04 October 2016
				US	8364629	B2	29 January 2013

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/086533

A. 主题的分类

G05D 1/02 (2020.01) 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)

G05D, G01C

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))

CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC: 机器人, 路径, 路线, 规划, 非规则, 不规则, 复杂, 异形, 形状, 核矩阵, 节点树, 反向, 神经网络, robot, auto+, path+, rout+, track+, abnorm+, figure, kernel, matrix, node?, tree, neural, network

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 106843211 A (东华大学) 2017年 6月 13日 (2017 - 06 - 13) 说明书第[0053]-[0079]段、附图1-2	1-10
A	CN 110057362 A (安徽理工大学) 2019年 7月 26日 (2019 - 07 - 26) 全文	1-10
A	CN 110426044 A (华南理工大学) 2019年 11月 8日 (2019 - 11 - 08) 全文	1-10
A	CN 104050390 A (西南交通大学) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文	1-10
A	CN 109839110 A (浙江大学) 2019年 6月 4日 (2019 - 06 - 04) 全文	1-10
A	US 2011004581 A1 (PALO ALTO RESEARCH CENTER INCORPORATED) 2011年 1月 6日 (2011 - 01 - 06) 全文	1-10



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

2020年 11月 10日

国际检索报告邮寄日期

2020年 11月 26日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(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

受权官员

索子繁

电话号码 86-(10)-53962587

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/086533

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	106843211	A	2017年 6月 13日	CN 106843211 B	2019年 11月 8日
CN	110057362	A	2019年 7月 26日	无	
CN	110426044	A	2019年 11月 8日	无	
CN	104050390	A	2014年 9月 17日	CN 104050390 B	2017年 5月 17日
CN	109839110	A	2019年 6月 4日	CN 109839110 B	2020年 7月 24日
US	2011004581	A1	2011年 1月 6日	US 2012246193 A1	2012年 9月 27日
				EP 2270677 A2	2011年 1月 5日
				JP 2011014139 A	2011年 1月 20日
				JP 5552382 B2	2014年 7月 16日
				US 9460053 B2	2016年 10月 4日
				US 8364629 B2	2013年 1月 29日