

(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
2025 年 6 月 5 日 (05.06.2025)



(10) 国际公布号
WO 2025/112151 A1

(51) 国际专利分类号:

G05D 1/43 (2024.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2023/142297

(22) 国际申请日:

2023 年 12 月 27 日 (27.12.2023)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(30) 优先权:

202311614707.7 2023年11月28日 (28.11.2023) CN

(71) 申请人: 深圳市优必选科技股份有限公司(UBTECH

ROBOTICS CORP LTD) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区桃源街道长源社区学苑大道1001号南山智园C1栋2201 518000 (CN)。

(72) 发明人: 罗璇(LUO, Xuan); 中国广东省深圳市南山区桃源街道长源社区学苑大道1001号南山智园C1

栋2201 518000 (CN)。 陈春玉(CHEN, Chunyu); 中

国广东省深圳市南山区桃源街道长源社区学苑大道1001号南山智园C1栋2201 518000 (CN)。 谭欢(TAN, Huan); 中国广东省深圳市南山区桃源街道长源社区学苑大道1001号南山智园C1栋2201 518000 (CN)。 熊友军(XIONG, Youjun); 中国广东省深圳市南山区桃源街道长源社区学苑大道1001号南山智园C1栋2201 518000 (CN)。

(74) 代理人: 深圳中一联合知识产权代理

有限公司 (SHENZHEN ZHONGYI UNION INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO.,LTD.);

中国广东省深圳市福田区莲花街道紫荆社区深南大道6008号深圳特区报业大厦33层 518034 (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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,

(54) Title: ROBOT OBSTACLE AVOIDANCE CONTROL METHOD AND RELATED DEVICE

(54) 发明名称: 一种机器人避障控制方法及相关设备

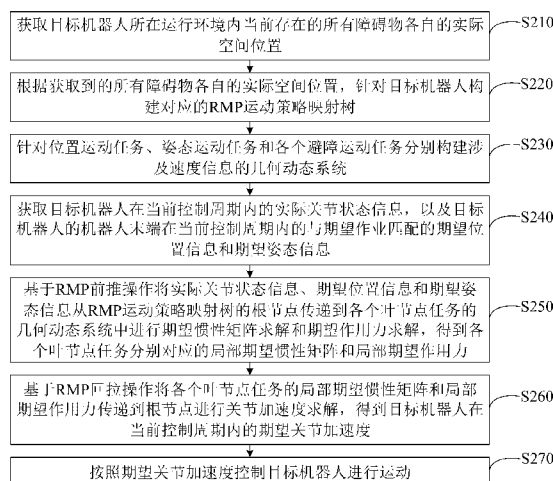


图 2

(57) Abstract: The present application relates to the technical field of robot control. Provided are a robot obstacle avoidance control method and a related device. In the present application, an RMP mapping tree is constructed on the basis of individual actual spatial positions of all obstacles currently present in an operating environment where a target robot is located, such that a root node task of the RMP mapping tree corresponds to a robot joint space, and corresponding leaf node tasks comprise a position motion task and a pose motion task of a robot tail end executing an expected operation, and comprise obstacle avoidance motion tasks of a plurality of robot key parts of the robot tail end respectively performing obstacle avoidance on the obstacles; and then, geometric dynamical systems involving speed information are respectively constructed for various motion tasks, and an expected joint acceleration is solved on the basis of an RMP push-forward operation and an RMP pull-back operation, so as to control the target robot to move, thereby enabling the robot to achieve expected operation execution effects while avoiding dynamic obstacles with high agility and real-time performance.

GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本申请提供一种机器人避障控制方法及相关设备, 涉及机器人控制技术领域。本申请根据目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置构建RMP运动策略映射树, 使RMP运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应, 且对应叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务, 以及包括机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务, 接着针对多种运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统, 并基于RMP前推操作和RMP回拉操作求解期望关节加速度, 来控制目标机器人进行运动, 从而使机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

一种机器人避障控制方法及相关设备

本申请要求于 2023 年 11 月 28 日在中国专利局提交的、申请号为 202311614707.7、发明名称为“一种机器人避障控制方法及相关设备”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及机器人控制技术领域，具体而言，涉及一种机器人避障控制方法及相关设备。

背景技术

随着科学技术的不断发展，机器人技术在各大行业的应用越发广泛，往往需要机器人在执行期望作业的过程中针对机器人运行环境内存在的各种障碍物进行规避，避免因障碍物碰撞机器人导致的机器人损伤、期望作业无法正常执行等问题。而在机器人实际运行过程中，机器人运行环境内的各种障碍物并不一定都属于静态障碍物，通常会有新增障碍物出现或者已有障碍物发生位置变动，即导致机器人运行环境内出现动态障碍物。因此，如何确保机器人在执行期望作业的过程中能够针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避，便是当今机器人控制技术领域中的一项重要技术问题。

技术问题

有鉴于此，本申请的目的在于提供一种机器人避障控制方法及装置、机器人控制设备和可读存储介质，能够利用 RMP（Riemannian Motion Policies，黎曼运动策略）的快速迭代求解特性，确保机器人在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果，提升机器人避障实时性，并通过引入涉及速度信息的几何动态系统（Geometric Dynamical System，GDS）进行局部运动策略计算，以利用几何动态系统的速度连续特性，提升机器人避障灵巧性，从而确保机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

技术方案

为了实现上述目的，本申请实施例采用的技术方案如下：

第一方面，本申请提供一种机器人避障控制方法，所述方法包括：

获取目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置；

根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对所述目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树，其中所述 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，所述 RMP 运动策略映射树的叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括所述机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务；

针对所述位置运动任务、所述姿态运动任务和各个所述避障运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统；

获取所述目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息，以及所述目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与所述期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息；

基于 RMP 前推操作将所述实际关节状态信息、所述期望位置信息和所述期望姿态信息从所述 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到各个叶节点任务分别对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力；

基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到所述根节点进行关节加速度求解，得到所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度；

按照所述期望关节加速度控制所述目标机器人进行运动。

第二方面，本申请提供一种机器人避障控制装置，所述装置包括：

障碍物确定模块，用于获取目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置；

RMP 树构建模块，用于根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对所述目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树，其中所述 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，所述 RMP 运动策略映射树的叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括所述机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务；

动态系统构建模块，用于针对所述位置运动任务、所述姿态运动任务和各个所述避障运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统；

运动参数获取模块，用于获取所述目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息，以及所述目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与所述期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息；

局部策略求解模块，用于基于 RMP 前推操作将所述实际关节状态信息、所述期望位置信息和所述期望姿态信息从所述 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到各个叶节点任务分别对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力；

全局策略求解模块，用于基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到所述根节点进行关节加速度求解，得到所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度；
避障作业控制模块，用于按照所述期望关节加速度控制所述目标机器人进行运动。

第三方面，本申请提供一种机器人控制设备，包括处理器和存储器，所述存储器存储有可被所述处理器执行的计算机程序，所述处理器可执行所述计算机程序，以实现前述实施方式中任意一项所述的机器人避障控制方法。

第四方面，本申请提供一种可读存储介质，其上存储有计算机程序，所述计算机程序被运行时，实现前述实施方式中任意一项所述的机器人避障控制方法。

有益效果

在此情况下，本申请实施例的有益效果可以包括以下内容：

本申请根据目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置构建 RMP 运动策略映射树，使 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，且对应叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务，接着针对前述多种运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统，并基于 RMP 前推操作将目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息，以及目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息，从 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力，然后基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到根节点进行关节加速度求解，得到目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度，并按照期望关节加速度控制目标机器人进行运动，从而利用 RMP 前推操作和 RMP 回拉操作所对应的快速迭代求解特性，确保机器人在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果，提升机器人避障实时性，并在 RMP 前推操作实施过程中引入涉及速度信息的几何动态系统进行局部运动策略计算，以利用几何动态系统的速度连续特性，提升机器人避障灵巧性，来确保机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

为使本申请的上述目的、特征和优点能更明显易懂，下文特举较佳实施例，并配合所附附图，作详细说明如下。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例的技术方案，下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍，应当理解，以下附图仅示出了本申请的某些实施例，因此不应被看作是对范围的限定，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他相关的附图。

图 1 为本申请实施例提供的机器人控制设备的组成示意图；

图 2 为本申请实施例提供的机器人避障控制方法的流程示意图；

图 3 为图 2 中的步骤 S220 包括的子步骤的流程示意图；

图 4 为本申请实施例提供的 RMP 运动策略映射树的树形结构示意图；

图 5 为图 2 中的步骤 S260 包括的子步骤的流程示意图；

图 6 为本申请实施例提供的机器人避障控制装置的组成示意图。

图标：10-机器人控制设备；11-存储器；12-处理器；13-通信单元；100-机器人避障控制装置；110-障碍物确定模块；120- RMP 树构建模块；130-动态系统构建模块；140-运动参数获取模块；150-局部策略求解模块；160-全局策略求解模块；170-避障作业控制模块。

本发明的实施方式

为使本申请实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。通常在此处附图中描述和示出的本申请实施例的组件可以以各种不同的配置来布置和设计。

因此，以下对在附图中提供的本申请的实施例的详细描述并非旨在限制要求保护的本申请的范围，

而是仅仅表示本申请的选定实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

应注意到：相似的标号和字母在下面的附图中表示类似项，因此，一旦某一项在一个附图中被定义，则在随后的附图中不需要对其进行进一步定义和解释。

在本申请的描述中，需要理解的是，术语“第一”和“第二”等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来，而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且，术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素，而且还包括没有明确列出的其他要素，或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个……”限定的要素，并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。对于本领域的普通技术人员而言，可以具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

在本申请的描述中，还需要说明的是，除非另有明确的规定和限定，术语“设置”、“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

申请人通过辛苦调研发现，现有控制机器人进行避障的方法，大致可以分为如下四种：

(1) 采样法：采样法是通过在机器人所在运行环境内随机采样的方式来判断并扩展无碰撞区域，当扩展至目标位置时，便可自动形成一条无碰撞路径。该方法的优势在于其完备性，即当无碰撞路径存在时，采样法一定能找到，因此适用于大范围复杂环境的路径搜索，但该方法并不能保证生成的路径最短或速度连续，同时其求解效率也存在很大随机性，实质适用于针对静态障碍物的避障效果。

(2) 优化法：优化法是通过在运动起始点和运动目标点之间建立简单的插值路径点作为参考，再以无碰撞作为这些插值路径点的约束，构造关于机器人关节输出量的数值优化方程进行求解。该方法的优势在于可以根据任务要求完善优化方程，例如要求路径最短或时间最短等，而对应优化方程一旦求解完成，便能获得一条理想的无碰撞轨迹。但是优化法的求解质量和效率是呈反相关性的，因此该方法通常作为离线静态避障规划方法来使用。

(3) 随机过程法：随机过程法可看作是采样法和优化法的结合，只不过采样和优化的元素是描述连续轨迹的高斯过程参数。该方法的优势在于天然具有速度连续性，且可以通过概率推理方法来加快优化过程。但即便如此，随机过程法也只能做到环境中识别出新增障碍物后进行快速重规划，其求解速率并不足以实现面对动态障碍物的实时在线规划。

(4) 势能法：势能法则是基于势力场思想，将运动目标点当作势力场中的引力源，障碍物当作斥力源，从而可根据与引力源和斥力源之间叠加的势能，引导机器人在向运动目标点移动的同时避开障碍物。该方法的优势在于算法实施简单，解算快速，可以在一定程度上针对动态障碍物进行避障。而之所以说一定程度，是由于势能法仅考虑了机器人的位置状态信息，这使得该方法很容易因动态灵巧性不足而陷入局部最优卡死，实质无法针对动态障碍物进行高灵巧性地规避。

在此情况下，为解决上述问题，本申请实施例通过提供一种机器人避障控制方法及装置、机器人控制设备和可读存储介质，以利用 RMP 的快速迭代求解特性和涉及速度信息的几何动态系统的速度连续特性，确保机器人在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果，提升机器人避障实时性和机器人避障灵巧性，使机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

下面结合附图，对本申请的一些实施方式作详细说明。在不冲突的情况下，下述的实施例及实施例中的特征可以相互结合。

请参照图 1，图 1 是本申请实施例提供的机器人控制设备 10 的组成示意图。在本申请实施例中，所述机器人控制设备 10 与目标机器人通信连接，用于控制所述目标机器人的运动状态，使所述目标机器人在执行复杂操作任务的同时，快速且灵活地避开所述目标机器人所在运行环境内的动态障碍物。其中，所述机器人控制设备 10 可以是独立于所述目标机器人的计算机设备，也可以是与所述目标机器人集成在一起的硬件模块设备。其中，所述计算机设备可以是个人计算机、云服务器、笔记本电脑、平板电脑等；所述目标机器人可以是位控、力控或力位混合控制的串/并联构型冗余机器人，也可以是应用于工业、服务业和特种行业等领域的冗余机械臂、四足机器人或仿人机器人。

在本申请实施例中，所述机器人控制设备 10 可以包括存储器 11、处理器 12、通信单元 13 及机器人避障控制装置 100。其中，所述存储器 11、所述处理器 12 及所述通信单元 13 各个元件相互之间直接或间接地电性连接，以实现数据的传输或交互。例如，所述存储器 11、所述处理器 12 及所述通信单元 13 这些元件相互之间可通过一条或多条通讯总线或信号线实现电性连接。

在本申请实施例中，所述存储器 11 可以是，但不限于，随机存取存储器（Random Access Memory，RAM），只读存储器（Read Only Memory，ROM），可编程只读存储器（Programmable Read-Only Memory，PROM），可擦除只读存储器（Erasable Programmable Read-Only Memory，EPROM），电可擦除只读存储器（Electric Erasable Programmable Read-Only Memory，EEPROM）等。其中，所述存储器 11 用于存储计算机程序，所述处理器 12 在接收到执行指令后，可相应地执行所述计算机程序。

在本申请实施例中，所述处理器 12 可以是一种具有信号的处理能力的集成电路芯片。所述处理器 12 可以是通用处理器，包括中央处理器（Central Processing Unit，CPU）、图形处理器（Graphics Processing Unit，GPU）及网络处理器（Network Processor，NP）、数字信号处理器（DSP）、专用集成电路（ASIC）、现场可编程门阵列（FPGA）或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件中的至少一种。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等，可以实现或者执行本申请实施例中的公开的各方法、步骤及逻辑框图。

在本申请实施例中，所述通信单元 13 用于通过网络建立所述机器人控制设备 10 与其他电子设备之间的通信连接，并通过所述网络收发数据，其中所述网络包括有线通信网络及无线通信网络。例如，所述机器人控制设备 10 可通过所述通信单元 13 从作业规划设备处获取所述目标机器人的机器人末端所需执行的期望作业的运动轨迹信息，其中所述运动轨迹信息可以包括所述目标机器人的机器人末端在执行期望作业过程中的不同控制周期各自对应的期望位置信息、期望姿态信息等；所述机器人控制设备 10 可通过所述通信单元 13 向所述目标机器人发送关节控制指令，以驱使所述目标机器人按照接收到的关节控制指令进行运动。

在本申请实施例中，所述机器人避障控制装置 100 可以包括至少一个能够以软件或固件的形式存储于所述存储器 11 中或者固化在所述机器人控制设备 10 的操作系统中的软件功能模块。所述处理器 12 可用于执行所述存储器 11 存储的可执行模块，例如所述机器人避障控制装置 100 所包括的软件功能模块及计算机程序等。所述机器人控制设备 10 可通过所述机器人避障控制装置 100 利用 RMP 的快速迭代求解特性和涉及速度信息的几何动态系统的速度连续特性，确保机器人在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果，提升机器人避障实时性和机器人避障灵巧性，使机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

可以理解的是，图 1 所示的框图仅为所述机器人控制设备 10 的一种组成示意图，所述机器人控制设备 10 还可包括比图 1 中所示更多或者更少的组件，或者具有与图 1 所示不同的配置。图 1 中所示的各组件可以采用硬件、软件或其组合实现。

在本申请中，为确保所述机器人控制设备 10 能够利用 RMP 的快速迭代求解特性和涉及速度信息的几何动态系统的速度连续特性，确保机器人在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果，提升机器人避障实时性和机器人避障灵巧性，使机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避，本申请实施例提供一种机器人避障控制方法实现前述目的。下面对本申请提供的机器人避障控制方法进行详细描述。

请参照图 2，图 2 是本申请实施例提供的机器人避障控制方法的流程示意图。在本申请实施例中，图 2 所示的机器人避障控制方法应用于上述机器人控制设备 10，所述机器人避障控制方法可以包括步骤 S210~步骤 S270。

步骤 S210，获取目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置。

其中，可通过在所述目标机器人所在运行环境内安装至少一个障碍物探测设备，以通过所述至少一个障碍物探测设备探测所述运行环境内当前存在哪些障碍物，以及当前存在的各个障碍物在当前时刻于所述运行环境内的实际空间位置，而后由所述至少一个障碍物探测设备将探测出的所述运行环境内所有障碍物各自的实际空间位置发送给所述机器人控制设备 10，以便于所述机器人控制设备 10 直观地确定出所述目标机器人所在运行环境内的障碍物数量变化情况和障碍物位置变化情况。其中，前述障碍物探测设备可以是，但不限于，激光雷达、摄像头、超声波雷达等；所述障碍物探测设备可以安装在所述目标机器人上，也可以围绕所述目标机器人进行设置，还可以在所述机器人控制设备 10 置于所述运行环

境内的情况下对应设置在所述机器人控制设备 10 上，所述障碍物探测设备的具体数量和/或具体设置方式可根据机器人运行环境监测需求进行不同设置，本申请对此不作限定。

步骤 S220，根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树。

5 在本实施例中，所述 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，所述 RMP 运动策略映射树的叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括所述机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务。其中，所述位置运动任务用于表征所述目标机器人的机器人末端在位置维度层面执行期望作业的运动任务，所述姿态运动任务用于表征所述目标机器人的机器人末端在姿态维度层面执行期望作业的运动任务，所述避障运动任务用于表征所述目标机器人的机器人关键部位相对于所述运行环境内的已有障碍物进行规避的运动任务。

而对 RMP（即黎曼运动策略）来说，其实质属于在黎曼流形空间下由二阶微分方程描述的带有几何信息的运动策略，RMP 的数学规范形式（canonical form）可表示为 $(a, M)^{\mathcal{M}}$ ，RMP 的数学自然形式（natural form）可表示为 $[f, M]^{\mathcal{M}}$ 。其中， $\mathcal{M}$ 表示空间坐标属于 P^{m^u} 的 m 维黎曼流形空间， $a: P^m \times P^m \rightarrow P^m$ 表示一个二阶连续的运动策略， $M: P^m \times P^m \rightarrow P^{m \times m}$ 表示一个微分映射， $f = Ma$ 。该 RMP 在应用到机器人动力学中时，可将 a 视为期望加速度，将 M 视为期望惯性矩阵，并将 f 视为期望作用力。

因此，当所述机器人控制设备 10 得到所述运行环境内实际存在的所有障碍物各自的实际空间位置后，可按照 RMP 架构将机器人运动任务拆分成包含在机器人关节空间、机器人任务空间等不同维度黎曼空间内的多个运动策略，使拆分出的处于机器人关节空间内的运动策略可直接充当 RMP 运动策略映射树的根节点，拆分出的处于机器人任务空间内的运动策略可直接充当 RMP 运动策略映射树的叶节点，此时该 RMP 运动策略映射树的根节点任务实质用于表征所述目标机器人在机器人关节空间下实现机器人运动任务所对应的期望效果的全局运动任务（即全局运动策略），该 RMP 运动策略映射树的叶节点任务用于表征所述目标机器人在机器人任务空间下实现机器人运动任务的分支子任务的局部运动任务（即局部运动策略），由此所述机器人控制设备 10 可通过将“驱动目标机器人执行期望作业，且保证目标机器人的每个机器人关键部位对当前运行环境下的各个障碍物进行规避”作为机器人运动任务进行拆分，从而得到包括有根节点任务“机器人关节空间下的全局运动任务”、叶节点任务“机器人末端在机器人任务空间下执行期望作业的位置运动任务”、叶节点任务“机器人末端在机器人任务空间下执行期望作业的姿态变化任务”、叶节点任务“机器人末端在机器人任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务”和叶节点任务“除机器人末端以外的每个机器人关键部位在机器人任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务”的 RMP 运动策略映射树。

30 可选地，在本实施例的一种实施方式中，所述机器人控制设备 10 可直接将根节点任务“机器人末端在机器人任务空间下执行期望作业的位置运动任务”作为各个叶节点任务的父节点，来构建所述 RMP 运动策略映射树，以通过该根节点任务所对应的机器人关节空间和各个叶节点任务所对应的机器人任务空间之间的空间变换关系，作为根节点与对应叶节点之间的连接边。

35 可选地，请参照图 3，图 3 是图 2 中的步骤 S220 包括的子步骤的流程示意图。在本实施例的另一种实施方式中，为确保本申请构建出的 RMP 运动策略映射树所涉及的各项局部运动策略能够比较容易地移植到另外一个机器人上进行使用，可通过在根节点与各个叶节点之间引入起承接作用的茎节点，并使该茎节点仅与机器人运动学模型相关，无需主动附加运动策略，以断开叶节点所对应的局部运动策略与目标机器人之间的机体关联性，从而在建立了一个叶节点后，可直接通过替换与之相连的茎节点任务，

即可将该叶节点所对应局部运动策略能够比较容易地移植到另外一个机器人上进行使用。此时，所述步骤 S220 可以包括子步骤 S221~子步骤 S225，以构建出运动策略移植性强的涉及期望作业和避障运动的 RMP 运动策略映射树。

子步骤 S221，对目标机器人在机器人关节空间下的全局运动任务进行任务拆解，得到目标机器人的
5 机器人末端在姿态空间下的姿态变化任务、机器人末端在位置空间下的位置变化任务，以及目标机器人的除机器人末端以外的各个机器人关键部位在对应位置空间下的位置变化任务。

在本实施例中，可采用 $\left((q, \dot{q}), [f_r, M_r]^{\mathcal{C}}\right)$ 表征所述目标机器人在机器人关节空间下 $\mathcal{C}$ 的全局运动任务，其中 $(q, \dot{q})$ 用于表征该全局运动任务所涉及的状态参数（关节位置，关节速度）， $[f_r, M_r]^{\mathcal{C}}$ 用于表征该全局运动任务所对应的 RMP 数学自然形式；可采用
10 $\left((x_0, \dot{x}_0), [f_{t_0}, M_{t_0}]^{\mathcal{X}_0}\right)$ 表征所述机器人末端在姿态空间 $\mathcal{X}_0$ 下的姿态变化任务，其中 $(x_0, \dot{x}_0)$ 用于表征该姿态变化任务所涉及的状态参数（姿态信息，姿态变化速度）， $[f_{t_0}, M_{t_0}]^{\mathcal{X}_0}$ 用于表征该姿态变化任务所对应的 RMP 数学自然形式，其中 $\mathcal{X}_0 \subseteq \text{SO}(3)$ ；可采用 $\left((x_1, \dot{x}_1), [f_{t_1}, M_{t_1}]^{\mathcal{X}_1}\right)$ 表征所述机器人末端在位置空间 $\mathcal{X}_1$ 下的位置变化任务，其中 $(x_1, \dot{x}_1)$ 用于表征该位置变化任务所涉及的状态参数（位置信息，位置变化速度）， $[f_{t_1}, M_{t_1}]^{\mathcal{X}_1}$ 用于表征该
15 位置变化任务所对应的 RMP 数学自然形式，其中 $\mathcal{X}_1 \subseteq \mathbf{R}^3$ ；可采用 $\left\{\left((x_i, \dot{x}_i), [f_{t_i}, M_{t_i}]^{\mathcal{X}_i}\right)\right\}_{i=2}^l$ 表征除机器人末端以外的 $l-1$ 个机器人关键部位各自在对应位置空间 $\mathcal{X}_i \mid (i=2, \dots, l)$ 下的位置变化任务，其中 $(x_i, \dot{x}_i) \mid (i=2, \dots, l)$ 用于表征第 i 个机器人关键部位的位置变化任务所涉及的状态参数（位置信息，位置变化速度）， $[f_{t_i}, M_{t_i}]^{\mathcal{X}_i} \mid (i=2, \dots, l)$ 用于表征第 i 个机器人关键部位的位置变化任务所对应的 RMP 数学自然形式，其中
20 $\mathcal{X}_i \subseteq \mathbf{R}^3 \mid (i=2, \dots, l)$ 。此时，前述全局运动任务可视为上述姿态变化任务和所有位置变化任务共同的父节点。

子步骤 S222，将机器人末端在姿态空间下的姿态变化任务拆解到机器人末端的任务空间下，得到机器人末端在对应任务空间下执行期望作业的姿态运动任务。

在本实施例中, 可采用 $\left((x_0, \dot{x}_0), [f_{g_o}, M_{g_o}]^{\mathcal{R}_0} \right)$ 表征所述机器人末端在任务空间 $\mathcal{R}_0$ 下执行期望作业的姿态运动任务, 其中 $(x_0, \dot{x}_0)$ 用于表征该姿态运动任务所涉及的状态参数 (姿态信息, 姿态变化速度), $[f_{g_o}, M_{g_o}]^{\mathcal{R}_0}$ 用于表征该姿态运动任务所对应的 RMP 数学自然形式, 其中 $\mathcal{R}_0 \subseteq \text{SO}(3)$, 此时前述姿态变化任务可视为姿态运动任务的父节点。

- 5 子步骤 S223, 根据所有障碍物各自的实际空间位置, 将机器人末端在位置空间下的位置变化任务拆解到机器人末端的任务空间下, 得到机器人末端在对应任务空间下执行期望作业的位置运动任务, 以及机器人末端在对应任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务。

在本实施例中, 可将机器人末端在位置空间 $\mathcal{X}_1$ 下的位置变化任务拆解到与位置空间 $\mathcal{X}_1$ 维度相同的任务空间 $\mathcal{R}_1$ 下, 得到所述机器人末端在任务空间 $\mathcal{R}_1$ 下执行期望作业的位置运动任务, 此时该位置运动任务可采用 $\left((x_1, \dot{x}_1), [f_{g_p}, M_{g_p}]^{\mathcal{R}_1} \right)$ 进行表征, 其中 $(x_1, \dot{x}_1)$ 用于表征该位置运动任务所涉及的状态参数 (位置信息, 位置变化速度), $[f_{g_p}, M_{g_p}]^{\mathcal{R}_1}$ 用于表征该位置运动任务所对应的 RMP 数学自然形式, 其中 $\mathcal{R}_1 \subseteq \mathbb{R}^3$, 此时前述位置变化任务可视为该位置运动任务的父节点。

同时, 可将机器人末端在位置空间 $\mathcal{X}_1$ 下的位置变化任务拆解到与各个障碍物对应的描述机器人末端与对应障碍物之间的相对距离变化状况的一维流形任务空间 $\mathcal{D}_j | (j=1, \dots, n)$ 下, 得到所述机器人末端在任务空间 $\mathcal{D}_j | (j=1, \dots, n)$ 下针对第 j 个障碍物进行避障的避障运动任务, 此时所述机器人末端在与第 j 个障碍物对应的任务空间 $\mathcal{D}_j | (j=2, \dots, n)$ 下对该障碍物进行避障的避障运动任务可采用 $\left((s_j^1, \dot{s}_j^1), [f_{a_j^1}, M_{a_j^1}]^{\mathcal{D}_j} \right)$ 进行表征, 其中 $(s_j^1, \dot{s}_j^1)$ 用于表征该避障运动任务所涉及的状态参数 (机器人末端到第 j 个障碍物之间的相对距离, 机器人末端与第 j 个障碍物之间的相对运动速度), $[f_{a_j^1}, M_{a_j^1}]^{\mathcal{D}_j}$ 用于表征该避障运动任务所对应的 RMP 数学自然形式, n 用于表示所述运行环境内的障碍物总数, 此时前述位置变化任务可视为该避障运动任务的父节点, 前述机器人末端与第 j 个障碍物之间的相对距离和相对运动速度均可基于第 j 个障碍物的实际空间位置求得。

子步骤 S224, 根据所有障碍物各自的实际空间位置, 将除机器人末端以外的各个机器人关键部位在

对应位置空间下的位置变化任务拆解到对应任务空间下，得到除机器人末端以外的各个机器人关键部位在对应任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务。

在本实施例中，针对除机器人末端以外的每个机器人关键部位，可将该机器人关键部位在对应位置空间 $\mathcal{X}_i \mid (i=2, \dots, l)$ 下的位置变化任务拆解到与各个障碍物对应的描述对应机器人关键部位与对

5 应障碍物之间的相对距离变化状况的一维流形任务空间 $\mathcal{D}_j \mid (j=1, \dots, n)$ 下，得到第 i ($i=2, \dots, l$)

个机器人关键部位在任务空间 $\mathcal{D}_j \mid (j=1, \dots, n)$ 下针对第 j 个障碍物进行避障的避障运动任务，此

时第 i 个机器人关键部位在与第 j 个障碍物对应的任务空间 $\mathcal{D}_j \mid (j=2, \dots, n)$ 下对该障碍物进行避

障的避障运动任务可采用 $\left((s_j^i, \dot{s}_j^i), \left[f_{a_j^i}, M_{a_j^i} \right]^{\mathcal{D}_j} \right)$ 进行表征，其中 $(s_j^i, \dot{s}_j^i)$ 用于表征该避障

运动任务所涉及的状态参数（第 i 个机器人关键部位与第 j 个障碍物之间的相对距离，第 i 个机器人关

10 键部位与第 j 个障碍物之间的相对运动速度）， $\left[f_{a_j^i}, M_{a_j^i} \right]^{\mathcal{D}_j}$ 用于表征该避障运动任务所对应的 RMP

数学自然形式，此时前述位置变化任务可视为该避障运动任务的父节点，前述第 i 个机器人关键部位与第 j 个障碍物之间的相对距离和相对运动速度均可基于第 j 个障碍物的实际空间位置求得。

子步骤 S225，根据机器人关节空间、姿态空间、位置空间和任务空间之间的空间变换关系，对全局运动任务、姿态变化任务、所有位置变化任务、姿态运动任务、位置运动任务和所有避障运动任务进行

15 树形结构构建，得到 RMP 运动策略映射树。

其中，所述机器人关节空间、姿态空间、位置空间和任务空间之间的空间变换关系可以包括机器人关节空间 $\mathcal{C}$ 与姿态空间 $\mathcal{X}_0$ 之间的空间变换关系、机器人关节空间 $\mathcal{C}$ 与位置空间 $\mathcal{X}_i \mid (i=1, \dots, l)$

之间的空间变换关系、姿态空间 $\mathcal{X}_0$ 与任务空间 $\mathcal{R}_0$ 之间的空间变换关系、位置空间 $\mathcal{X}_1$ 与任务空间 $\mathcal{R}_1$

之间的空间变换关系，以及位置空间 $\mathcal{X}_i \mid (i=1, \dots, l)$ 与任务空间 $\mathcal{D}_j \mid (j=1, \dots, n)$ 之间的空间

20 变换关系。

此时，以图4所示的RMP运动策略映射树的树形结构示意图为例，可将全局运动任务作为根节点 $\mathbf{r}$ ，

将姿态变化任务作为茎节点（即根节点 $\mathbf{r}$ 的子节点） t_0 ，将机器人末端的位置变化任务作为茎节点 t_1 ，

将除机器人末端以外的各个机器人关键部位的位置变化任务分别作为茎节点 $t_i \mid (i=2, \dots, l)$ ，将机

器人末端的姿态运动任务作为茎节点 t_0 的叶节点（即茎节点 t_0 的子节点） g_o ，将机器人末端的位置

25 运动任务作为茎节点 t_1 的叶节点 g_p ，将机器人末端的与第 $j(j=1, \dots, n)$ 个障碍物对应的避障运动任务作

为茎节点 t_1 的叶节点 a_j^1 ，将除机器人末端以外的第 i 个机器人关键部位的与第 $j(j=1, \dots, n)$ 个障碍物对应的

避障运动任务作为与第 i 个机器人关键部位对应的茎节点 t_i 的叶节点 a_j^i 。

望作业的姿态变化任务”、叶节点任务“机器人末端在机器人任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务”和叶节点任务“除机器人末端以外的每个机器人关键部位在机器人任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务”的 RMP 运动策略映射树。

- 5 由此，本申请可通过执行上述子步骤 S221~子步骤 S225，构建出运动策略移植性强的涉及期望作业和避障运动的 RMP 运动策略映射树。

步骤 S230，针对位置运动任务、姿态运动任务和各个避障运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统。

- 10 在本实施例中，几何动态系统可被看作定义在流形空间上的虚拟机械系统，其系统惯性由机械体的构型和速度共同决定，单个几何动态系统可采用数学元组 $(\mathcal{M}, \mathbf{G}, \mathbf{B}, \Phi)$ 进行表示，其中 $\mathcal{M}$ 用于表示对应几何动态系统所在的流形空间（例如，任务空间 $\mathcal{R}_0$ 、任务空间 $\mathcal{R}_1$ 和任务空间 $\mathcal{D}_j | (j=1, \dots, n)$ ），此时该几何动态系统需要满足如下条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} (G(x, \dot{x}) + \Xi_G(x, \dot{x}))\ddot{x} + \xi_G(x, \dot{x}) = -\nabla_x \Phi(x) - B(x, \dot{x})\dot{x} \\ \Xi_G(x, \dot{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \dot{x}_i \partial_{\dot{x}} g_i(x, \dot{x}) \\ \xi_G(x, \dot{x}) = \overset{x}{G}(x, \dot{x})\dot{x} - \frac{1}{2} \nabla_x (\dot{x}^T G(x, \dot{x}) \dot{x}) \\ \overset{x}{G}(x, \dot{x}) = [\partial_x g_i(x, \dot{x}) \dot{x}]_{i=1}^m \end{array} \right. ;$$

- 15 其中， $G(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的几何度量矩阵， $B(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的阻尼矩阵， $\Phi(x)$ 用于表示对应几何动态系统的势能方程， $\Xi_G(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的第一曲率项矩阵， $\xi_G(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的第二曲率项矩阵， $g_i(x, \dot{x})$ 用于表示 $G(x, \dot{x})$ 中第 i 列的子矩阵， ∂_x 用于表示对状态参数 x 求偏导， $\partial_{\dot{x}}$ 用于表示对状态参数 $\dot{x}$ 求偏导， ∇_x 用于表示对状态参数 x 求梯度， m 用于表示 $G(x, \dot{x})$ 的矩阵总列数，状态参数 $\dot{x}$ 为状态参数 x 的微分，状态参数 $\ddot{x}$ 为状态参数 $\dot{x}$ 的微分。
- 20

在此情况下，与位置运动任务对应的状态参数 x 和状态参数 $\dot{x}$ 分别用于表示所述机器人末端的位置信息和位置变化速度信息，与姿态运动任务对应的状态参数 x 和状态参数 $\dot{x}$ 分别用于表示所述机器人末端的姿态信息和姿态变化速度信息，与避障运动任务对应的状态参数 x 和状态参数 $\dot{x}$ 分别用于表示包括所述机器人末端的机器人关键部位和对应障碍物之间的相对距离信息和相对运动速度信息。

- 25 可以理解的是，上述位置运动任务、姿态运动任务和各个避障运动任务分别对应的几何动态系统可

根据机器人运动需求（例如，保持平衡、保持良好构型、平滑躲避障碍物撞击、平滑到达期望位置、平滑到达期望姿态、跳变式到达期望位置、跳变式达到期望姿态、骤停式躲避障碍物撞击等）进行设计，本申请对几何动态系统的具体设计思路不作限制。

可选地，在本实施例的一种实施方式中，可基于平滑到达期望姿态的机器人运动需求，将与姿态运动任务对应的几何动态系统设计为 $GDS(\mathcal{R}_0, G_{g_o}, B_{g_o}, \Phi_{g_o})$ ，其中 $\mathcal{R}_0$ 用于表示该姿态运动任务所在流形空间为叶节点 g_o 所在的任务空间， G_{g_o} 、 B_{g_o} 和 Φ_{g_o} 的计算公式如下所示：

$$\begin{cases} G_{g_o} = w^o \mathbf{I}, B_{g_o} = r_d w^o \\ w^o = (w_u^o - w_l^o) \times \exp(-\|e\|^2 / (2\sigma^2)) + w_l^o \\ \nabla_e \Phi_{g_o} = r_p \times \frac{1 - \exp(-2\alpha\|e\|)}{1 + \exp(-2\alpha\|e\|)} \times w^o \hat{e} \\ e = x_0 - x_0^g, \hat{e} = \frac{e}{\|e\|} \end{cases};$$

其中， G_{g_o} 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{R}_0, G_{g_o}, B_{g_o}, \Phi_{g_o})$ 的几何度量矩阵， $\mathbf{I}$ 用于表示与机器人关节空间维度相同的单位矩阵， w^o 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{R}_0, G_{g_o}, B_{g_o}, \Phi_{g_o})$ 的度量系数， B_{g_o} 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{R}_0, G_{g_o}, B_{g_o}, \Phi_{g_o})$ 的阻尼矩阵， Φ_{g_o} 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{R}_0, G_{g_o}, B_{g_o}, \Phi_{g_o})$ 的势能方程， x_0^g 用于表示机器人末端的期望姿态， x_0 用于表示机器人末端的实际姿态， e 用于表示机器人末端的实际姿态与期望姿态之间的向量差， $\|e\|$ 用于表示向量 e 的模， ∇_e 用于表示对向量 e 求梯度， w_u^o 用于表示度量系数 w^o 的上限值， w_l^o 用于表示度量系数 w^o 的下限值， r_p 用于表示比例增益， r_d 用于表示速度增益， σ 用于表示尺度参数， α 用于表示平滑度参数。

可选地，在本实施例的一种实施方式中，可基于平滑到达期望位置的机器人运动需求，将与位置运动任务对应的几何动态系统设计为 $GDS(\mathcal{R}_1, G_{g_p}, B_{g_p}, \Phi_{g_p})$ ，其中 $\mathcal{R}_1$ 用于表示该位置运动任务所在流形空间为叶节点 g_p 所在的任务空间， G_{g_p} 、 B_{g_p} 和 Φ_{g_p} 的计算公式如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{g_p} = w^p \mathbf{I}, B_{g_p} = r_d w^p \\ w^p = (w_u^p - w_l^p) \times \exp(-\|d\|^2 / (2\sigma^2)) + w_l^p \\ \nabla_d \Phi_{g_p} = r_p \times \frac{1 - \exp(-2\alpha \|d\|)}{1 + \exp(-2\alpha \|d\|)} \times w^p \hat{d} \\ d = x_1 - x_1^p, \hat{d} = \frac{d}{\|d\|} \end{array} \right. ;$$

其中, G_{g_p} 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{R}_1, G_{g_p}, B_{g_p}, \Phi_{g_p})$ 的几何度量矩阵, $\mathbf{I}$ 用于表

示与机器人关节空间维度相同的单位矩阵, w^p 用于表示几何动态系统

$GDS(\mathcal{R}_1, G_{g_p}, B_{g_p}, \Phi_{g_p})$ 的度量系数, B_{g_p} 用于表示几何动态系统

5 $GDS(\mathcal{R}_1, G_{g_p}, B_{g_p}, \Phi_{g_p})$ 的阻尼矩阵, Φ_{g_p} 用于表示几何动态系统

$GDS(\mathcal{R}_1, G_{g_p}, B_{g_p}, \Phi_{g_p})$ 的势能方程, x_1^p 用于表示机器人末端的期望位置, x_1 用于表示机

器人末端的实际位置, d 用于表示机器人末端的实际位置与期望位置之间的向量差, $\|d\|$ 用于表示向

量 d 的模, ∇_d 用于表示对向量 d 求梯度, w_u^p 用于表示度量系数 w^p 的上限值, w_l^p 用于表示度

量系数 w^p 的下限值, r_p 用于表示比例增益, r_d 用于表示速度增益, σ 用于表示尺度参数, α 用于

10 表示平滑度参数。

可选地, 在本实施例的一种实施方式中, 可基于平滑躲避障碍物撞击的机器人运动需求, 将第 i ($i=1, \dots, I$) 个机器人关键部位针对第 j ($j=1, \dots, n$) 个障碍物的避障运动任务所对应的几何动态系统设计

为 $GDS(\mathcal{D}_j, G_{a_j^i}, B_{a_j^i}, \Phi_{a_j^i})$, 其中 $\mathcal{D}_j$ 用于表示该避障运动任务所在流形空间为叶节点 a_j^i 所

在的任务空间, $G_{a_j^i}$ 、 $B_{a_j^i}$ 和 $\Phi_{a_j^i}$ 的计算公式如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{a_j^i} = w(s_j^i) \times u(\dot{s}_j^i), B_{a_j^i} = r_d G_{a_j^i} \\ \nabla_{s_j^i} \Phi_{a_j^i} = r_p \times w(s_j^i) \times \nabla_{s_j^i} w(s_j^i) \\ w(s_j^i) = \frac{\max(s_u - s_j^i, 0)}{\max(s_j^i - s_l, \varepsilon)} \\ u(\dot{s}_j^i) = \begin{cases} 1 - \exp(-(\dot{s}_j^i)^2 / (2\sigma^2)) & \dot{s}_j^i < 0 \\ 0 & \dot{s}_j^i \geq 0 \end{cases} \end{array} \right. ;$$

其中, $G_{a_j^i}$ 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{D}_j, G_{a_j^i}, B_{a_j^i}, \Phi_{a_j^i})$ 的几何度量矩阵, $B_{a_j^i}$ 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{D}_j, G_{a_j^i}, B_{a_j^i}, \Phi_{a_j^i})$ 的阻尼矩阵, $\Phi_{a_j^i}$ 用于表示几何动态系统 $GDS(\mathcal{D}_j, G_{a_j^i}, B_{a_j^i}, \Phi_{a_j^i})$ 的势能方程, s_j^i 用于表示第 i 个机器人关键部位与第 j 个障碍物之间的相对距离, $\dot{s}_j^i$ 用于表示第 i 个机器人关键部位与第 j 个障碍物之间的相对运动速度, $\nabla_{s_j^i}$ 用于表示对状态参数 s_j^i 求梯度, s_u 用于表示最大安全距离, s_l 用于表示最小安全距离, r_p 用于表示比例增益, r_d 用于表示速度增益, σ 用于表示尺度参数, ε 为一个数值较小的正数。

步骤 S240, 获取目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息, 以及目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息。

其中, 所述实际关节状态信息包括所述目标机器人的实际关节位置和实际关节速度, 所述实际关节状态信息可由所述机器人控制设备 10 从所述目标机器人处直接读取得到; 所述期望位置信息和所述期望姿态信息可由所述机器人控制设备 10 从所述目标机器人处读取得到, 也可由所述机器人控制设备 10 从作业规划设备处获取得到。本申请对于所述机器人控制设备 10 获取所述期望位置信息和所述期望姿态信息的具体方式不作限定。

步骤 S250, 基于 RMP 前推操作将实际关节状态信息、期望位置信息和期望姿态信息从 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解, 得到各个叶节点任务分别对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力。

在本实施例中, 对于 RMP 架构来说, RMP 前推操作实质属于将状态信息流从父节点朝子节点方向的前向传递运算, 而当存在一个父节点 $u = ((\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}), [\mathbf{f}, \mathbf{M}]^M)$, 以及该父节点下的 K 个子节点 $\{v_i = ((\mathbf{y}_i, \dot{\mathbf{y}}_i), [\mathbf{f}_i, \mathbf{M}_i]^{N_i})\}_{i=1}^K$, 其中该父节点与第 i 个子节点之间存在空间变换关系

$N_i = \psi_{e_i}(M)$ ，则前述 RMP 前推操作可被表示为：

$$(y_i, \dot{y}_i) = \text{pushforward}(x, \dot{x}) = (\psi_{e_i}(x), J_i(x)\dot{x});$$

其中， $J_i = \partial_x \psi_{e_i}$ ， ∂_x 用于表示对状态参数 x 求偏导。

由此，所述机器人控制设备 10 可基于所述 RMP 运动策略映射树所揭露的根节点与各个叶节点之间的空间变换关系（包括图 4 中的根节点与各个茎节点之间的空间变换关系，以及每个茎节点与其对应的至少一个叶节点之间的空间变换关系），通过 RMP 前推操作将上述实际关节状态信息、上述期望位置信息和上述期望姿态信息传递到各个叶节点的几何动态系统，而后针对每个叶节点的几何动态系统进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到每个叶节点在上述实际关节状态信息、上述期望位置信息和上述期望姿态信息的作用下实现自身对应的分支子任务所需的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力。

其中，每个几何动态系统所对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力的计算公式采用如下式子进行表示：

$$\begin{cases} M(x, \dot{x}) = G(x, \dot{x}) + \Xi_G(x, \dot{x}) \\ f(x, \dot{x}) = M(x, \dot{x})\ddot{x} = -\nabla_x \Phi(x) - B(x, \dot{x})\dot{x} - \xi_G(x, \dot{x}) \end{cases}$$

其中， $M(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的局部期望惯性矩阵， $f(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的局部期望作用力。

由此，本申请可通过上述计算公式对所述 RMP 运动策略映射树包括的各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力进行精准计算。

可选地，在本实施例的一种实施方式中，当与姿态运动任务对应的几何动态系统被设计为上述 $GDS(\mathcal{R}_0, G_{g_o}, B_{g_o}, \Phi_{g_o})$ ，则与该姿态运动任务对应的局部期望惯性矩阵 M_{g_o} 和局部期望作用力 f_{g_o} 的实际计算公式如下所示：

$$\begin{cases} M_{g_o} = G_{g_o} \\ \xi_{G_{g_o}} = -\frac{1}{2}(\|\dot{e}\|^2 \nabla_e w^o - 2\dot{e}\dot{e}^T \nabla_e w^o); \\ f_{g_o} = -\nabla_e \Phi_{g_o} - B_{g_o} \dot{e} - \xi_{G_{g_o}} \end{cases}$$

其中， $\dot{e}$ 用于表示机器人末端的实际姿态与期望姿态之间的向量变化速度， $\|\dot{e}\|$ 用于表示向量变化速度 $\dot{e}$ 的速率值。

可选地，在本实施例的一种实施方式中，当与位置运动任务对应的几何动态系统被设计为上述 $GDS(\mathcal{R}_1, G_{g_p}, B_{g_p}, \Phi_{g_p})$ ，则与该位置运动任务对应的局部期望惯性矩阵 M_{g_p} 和局部期望

作用力 f_{g_p} 的实际计算公式如下所示：

$$\begin{cases} M_{g_p} = G_{g_p} \\ \xi_{G_{g_p}} = -\frac{1}{2} \left(\|\dot{\mathbf{d}}\|^2 \nabla_d w^p - 2\dot{\mathbf{d}} \dot{\mathbf{d}}^T \nabla_d w^p \right); \\ f_{g_p} = -\nabla_d \Phi_{g_p} - B_{g_p} \dot{\mathbf{d}} - \xi_{G_{g_p}} \end{cases}$$

其中， $\dot{\mathbf{d}}$ 用于表示机器人末端的实际位置与期望位置之间的向量变化速度， $\|\dot{\mathbf{d}}\|$ 用于表示向量变化速度 $\dot{\mathbf{d}}$ 的速率值。

可选地，在本实施例的一种实施方式中，当第 i ($i=1, \dots, I$) 个机器人关键部位针对第 j ($j=1, \dots, n$)

5 个障碍物的避障运动任务所对应的几何动态系统被设计为上述 $GDS(\mathcal{D}_j, G_{a_j^i}, B_{a_j^i}, \Phi_{a_j^i})$ ，则与该避障运动任务对应的局部期望惯性矩阵 $M_{a_j^i}$ 和局部期望作用力 $f_{a_j^i}$ 的实际计算公式如下所示：

$$\begin{cases} M_{a_j^i} = G_{a_j^i} + \frac{1}{2} \dot{s}_j^i w(s_j^i) \times \nabla_{\dot{s}_j^i} u(\dot{s}_j^i) \\ \xi_{G_{a_j^i}} = \frac{1}{2} (\dot{s}_j^i)^2 u(\dot{s}_j^i) \times \nabla_{\dot{s}_j^i} w(s_j^i) \\ f_{a_j^i} = -\nabla_{\dot{s}_j^i} \Phi_{a_j^i} - B_{a_j^i} \dot{s}_j^i - \xi_{G_{a_j^i}} \end{cases};$$

其中， $\nabla_{\dot{s}_j^i}$ 用于表示对状态参数 $\dot{s}_j^i$ 求梯度。

步骤 S250，基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到根节点进行关节加速度求解，得到目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度。

在本实施例中，对于 RMP 架构来说，RMP 回拉操作实质属于将 RMP 信息流从子节点朝父节点方向的反向传递运算，而当存在一个父节点 $u = ((\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}), [\mathbf{f}, \mathbf{M}]^M)$ ，以及该父节点下的 K 个子节点 $\{v_i = ((\mathbf{y}_i, \dot{\mathbf{y}}_i), [\mathbf{f}_i, \mathbf{M}_i]^{N_i})\}_{i=1}^K$ ，其中该父节点与第 i 个子节点之间存在空间变换关系 $N_i = \psi_{e_i}(\mathbf{M})$ 且 $\mathbf{J}_i = \partial_{\mathbf{x}} \psi_{e_i}$ ，则前述 RMP 回拉操作可被表示为：

$$\begin{cases} \mathbf{f} = \sum_{i=1}^K \mathbf{J}_i^T (\mathbf{f}_i - \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{J}}_i \dot{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{M} = \sum_{i=1}^K \mathbf{J}_i^T \mathbf{M}_i \mathbf{J}_i \end{cases};$$

其中， $\dot{\mathbf{J}}_i$ 用于表示 $\mathbf{J}_i$ 的微分。

由此，所述机器人控制设备 10 可基于所述 RMP 运动策略映射树所揭露的根节点与各个叶节点之间的空间变换关系（包括图 4 中的根节点与各个茎节点之间的空间变换关系，以及每个茎节点与其对应的至少一个叶节点之间的空间变换关系），通过 RMP 回拉操作将上述各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到根节点，得到该根节点在机器人关节空间内同时实现各个叶节点任务的期望任务效果的全局期望惯性矩阵和全局期望作用力，而后基于得到的全局期望惯性矩阵和全局期望作用力针对该根节点进行关节加速度求解，从而得到实现机器人运动任务所对应的全局运动策略的期望效果的期望关节加速度。

此时，请参照图 5，图 5 是图 2 中的步骤 S260 包括的子步骤的流程示意图。在本申请实施例中，所述步骤 S260 可以包括子步骤 S261 及子步骤 S262，以将涉及动态障碍避障功能和期望作业执行功能的多种局部运动策略快速整合成一个全局运动策略，确保该全局运动策略的策略输出量能够实现全部局部运动策略的机器人运动效果，同时通过 RMP 传播算法（包括 RMP 前推操作和 RMP 回拉操作）确保全局运动策略的输出实时性，来确保目标机器人在执行期望作业的过程中能够针对动态障碍物实现反应式避障效果。

子步骤 S261，根据 RMP 运动策略映射树内的根节点与各个叶节点之间的空间变换关系，基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到根节点处，得到根节点在当前控制周期内的全局期望惯性矩阵和全局期望作用力。

子步骤 S262，根据全局期望惯性矩阵和全局期望作用力，计算目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度。

在本实施例的一种实施方式中，所述机器人控制设备 10 在得到所述根节点所对应的全局期望惯性矩阵和全局期望作用力后，可基于 RMP 的数学规范形式和数学自然形式之间的转换关系，采用如下式子计算出所述目标机器人在当前控制周期内的与全局运动策略对应的期望关节加速度：

$$a = M^+ f ;$$

其中， $M^+ = (M^T M)^{-1} M^T$ ， a 用于表示期望关节加速度， M^+ 用于表示全局期望惯性矩阵 M 的伪逆矩阵， f 用于表示全局期望作用力。

在本实施例的另一种实施方式中，为避免所述机器人控制设备 10 在所述目标机器人运动至奇异位型附近时出现期望关节加速度结算结果过大的状况，影响全局运动策略求解过程的安全性和可靠性，上述子步骤 S262 可以包括子步骤 a~子步骤 c：

子步骤 a，根据目标机器人的关节极限运动位置区间及关节加速度调控区间，针对目标机器人的关节加速度构建目标加速度约束条件。

其中，所述目标加速度约束条件采用如下式子进行表示：

$$\max\left(\ddot{q}_l, \frac{2}{\Delta t^2}(q_l - q^* - \dot{q}^* \Delta t)\right) \leq \ddot{q} \leq \min\left(\ddot{q}_u, \frac{2}{\Delta t^2}(q_u - q^* - \dot{q}^* \Delta t)\right);$$

其中, q^* 用于表示所述实际关节状态信息包括的实际关节位置, $\dot{q}^*$ 用于表示所述实际关节状态信息包括的实际关节速度, Δt 用于表示单个控制周期的周期时长, q_u 用于表示所述关节极限运动位置区间包括的关节位置上限值, q_l 用于表示所述关节极限运动位置区间包括的关节位置下限值, $\ddot{q}_u$ 用于表示所述关节加速度调控区间包括的关节加速度上限值, $\ddot{q}_l$ 用于表示所述关节加速度调控区间包括的关节加速度下限值, $\ddot{q}$ 用于表示所述目标机器人的关节加速度。

子步骤 b, 根据全局期望惯性矩阵和全局期望作用力, 针对目标机器人的关节加速度构建对应的加速度误差函数。

其中, 所述加速度误差函数采用如下式子进行表示:

$$(M_r \ddot{q} - f_r)^T (M_r \ddot{q} - f_r);$$

其中, M_r 用于表示所述全局期望惯性矩阵, f_r 用于表示所述全局期望作用力。

子步骤 c, 以最小化加速度误差函数的实际输出大小为目的, 基于目标加速度约束条件针对关节加速度进行二次规划问题求解, 得到目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度。

其中, 计算所述期望关节加速度的二次规划问题表达式采用如下式子进行表示:

$$\begin{aligned} \min_{\ddot{q}} & \quad (M_r \ddot{q} - f_r)^T (M_r \ddot{q} - f_r) \\ \text{s.t.} \quad & \max\left(\ddot{q}_l, \frac{2}{\Delta t^2}(q_l - q^* - \dot{q}^* \Delta t)\right) \leq \ddot{q} \leq \min\left(\ddot{q}_u, \frac{2}{\Delta t^2}(q_u - q^* - \dot{q}^* \Delta t)\right). \end{aligned}$$

由此, 本申请可通过执行上述子步骤 a~子步骤 c, 以避免所述机器人控制设备 10 在所述目标机器人运动至奇异位型附近时出现期望关节加速度结算结果过大的状况, 提高全局运动策略求解过程的安全性和可靠性。

步骤 S270, 按照期望关节加速度控制目标机器人进行运动。

在本实施例中, 当所述机器人控制设备 10 得到所述目标机器人在当前控制周期内的与全局运动策略匹配的期望关节加速度后, 可基于所述目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息及所述期望关节加速度, 计算所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节状态信息 (包括所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节位置和期望关节加速度), 而后按照得到的所述期望关节状态信息控制所述目标机器人在机器人关节空间内的实际关节状态信息, 以确保所述目标机器人能够在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果, 来保证所述目标机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

由此, 本申请可通过执行上述步骤 S220~步骤 S270, 利用 RMP 前推操作和 RMP 回拉操作所对应的快速迭代求解特性, 确保所述目标机器人在执行期望作业的过程中针对动态障碍物实现反应式避障效果, 提升机器人避障实时性, 并在 RMP 前推操作实施过程中引入涉及速度信息的几何动态系统进行局部运动策略计算, 以利用几何动态系统的速度连续特性, 提升机器人避障灵巧性, 来确保所述目标机器人在实现期望作业执行效果的同时针对动态障碍物进行高灵巧性且高实时性地规避。

在本申请中, 为确保所述机器人控制设备 10 能够有效执行上述机器人避障控制方法, 本申请通过

对存储在所述机器人控制设备 10 中的机器人避障控制装置 100 进行功能模块划分的方式实现前述功能。下面对本申请提供的应用于上述机器人控制设备 10 的机器人避障控制装置 100 的具体组成进行相应描述。

请参照图 6，图 6 是本申请实施例提供的机器人避障控制装置 100 的组成示意图。在本申请实施例中，所述机器人避障控制装置 100 可以包括障碍物确定模块 110、RMP 树构建模块 120、动态系统构建模块 130、运动参数获取模块 140、局部策略求解模块 150、全局策略求解模块 160 及避障作业控制模块 170。

障碍物确定模块 110，用于获取目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置。

RMP 树构建模块 120，用于根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树，其中 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，RMP 运动策略映射树的叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务。

动态系统构建模块 130，用于针对位置运动任务、姿态运动任务和各个避障运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统。

运动参数获取模块 140，用于获取目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息，以及目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息。

局部策略求解模块 150，用于基于 RMP 前推操作将实际关节状态信息、期望位置信息和期望姿态信息从 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到各个叶节点任务分别对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力。

全局策略求解模块 160，用于基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到根节点进行关节加速度求解，得到目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度。

避障作业控制模块 170，用于按照期望关节加速度控制目标机器人进行运动。

需要说明的是，本申请实施例所提供的机器人避障控制装置 100，其基本原理及产生的技术效果与前述的机器人避障控制方法相同。为简要描述，本实施例部分未提及之处，可参考上述的针对机器人避障控制方法的描述内容。

在本申请所提供的实施例中，应该理解到，所揭露的装置和方法，也可以通过其它的方式实现。以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，例如，附图中的流程图和框图显示了根据本申请的实施例的装置、方法和计算机程序产品的可能实现的体系架构、功能和操作。在这点上，流程图或框图中的每个方框可以代表一个模块、程序段或代码的一部分，模块、程序段或代码的一部分包含一个或多个用于实现规定的逻辑功能的可执行指令。也应当注意，在有些作为替换的实现方式中，方框中所标注的功能也可以以不同于附图中所标注的顺序发生。例如，两个连续的方框实际上可以基本并行地执行，它们有时也可以按相反的顺序执行，这依所涉及的功能而定。也要注意，框图和/或流程图中的每个方框、以及框图和/或流程图中的方框的组合，可以用执行规定的功能或动作的专用的基于硬件的系统来实现，或者可以用专用硬件与计算机指令的组合来实现。

另外，在本申请各个实施例中的各功能模块可以集成在一起形成一个独立的部分，也可以是各个模块单独存在，也可以两个或两个以上模块集成形成一个独立的部分。本申请提供的各项功能如果以软件功能模块的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个存储介质中。基于这样的理解，本申请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可读存储介质中，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，机器人，或网络设备等）执行本申请各个实施例记载方法的全部或部分步骤。而前述的可读存储介质包括：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。

以上所述，仅为本申请的各种实施方式，但本申请的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的人员在本申请揭露的技术范围内，可轻易想到变化或替换，都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此，本申请的保护范围应当以权利要求的保护范围为准。

权利要求书

1.一种机器人避障控制方法，其特征在于，所述方法包括：

获取目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置；

5 根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对所述目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树，其中所述 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，所述 RMP 运动策略映射树的叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括所述机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务；

针对所述位置运动任务、所述姿态运动任务和各个所述避障运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统；

10 获取所述目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息，以及所述目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与所述期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息；

基于 RMP 前推操作将所述实际关节状态信息、所述期望位置信息和所述期望姿态信息从所述 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到各个叶节点任务分别对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力；

15 基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到所述根节点进行关节加速度求解，得到所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度；

按照所述期望关节加速度控制所述目标机器人进行运动。

2.根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对所述目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树的步骤，包括：

20 对所述目标机器人在所述机器人关节空间下的全局运动任务进行任务拆解，得到所述目标机器人的机器人末端在姿态空间下的姿态变化任务、所述机器人末端在位置空间下的位置变化任务，以及所述目标机器人的除所述机器人末端以外的各个机器人关键部位在对应位置空间下的位置变化任务；

将所述机器人末端在姿态空间下的姿态变化任务拆解到所述机器人末端的任务空间下，得到所述机器人末端在对应任务空间下执行期望作业的姿态运动任务；

25 根据所有障碍物各自的实际空间位置，将所述机器人末端在位置空间下的位置变化任务拆解到所述机器人末端的任务空间下，得到所述机器人末端在对应任务空间下执行期望作业的位置运动任务，以及所述机器人末端在对应任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务；

30 根据所有障碍物各自的实际空间位置，将除所述机器人末端以外的各个机器人关键部位在对应位置空间下的位置变化任务拆解到对应任务空间下，得到除所述机器人末端以外的各个机器人关键部位在对应任务空间下针对各个障碍物进行避障的避障运动任务；

根据机器人关节空间、姿态空间、位置空间和任务空间之间的空间变换关系，对所述全局运动任务、所述姿态变化任务、所有位置变化任务、所述姿态运动任务、所述位置运动任务和所有避障运动任务进行树形结构构建，得到所述 RMP 运动策略映射树。

3.根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述位置运动任务、所述姿态运动任务和各个所述避障运动任务各自的几何动态系统均满足如下条件：

35

$$\left\{ \begin{array}{l} (G(x, \dot{x}) + \Xi_G(x, \dot{x}))\ddot{x} + \xi_G(x, \dot{x}) = -\nabla_x \Phi(x) - B(x, \dot{x})\dot{x} \\ \Xi_G(x, \dot{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \dot{x}_i \partial_{\dot{x}} g_i(x, \dot{x}) \\ \xi_G(x, \dot{x}) = \overset{x}{G}(x, \dot{x})\dot{x} - \frac{1}{2} \nabla_x (\dot{x}^T G(x, \dot{x}) \dot{x}) \\ \overset{x}{G}(x, \dot{x}) = [\partial_x g_i(x, \dot{x}) \dot{x}]_{i=1}^m \end{array} \right. ;$$

其中， $G(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的几何度量矩阵， $B(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的阻尼矩阵， $\Phi(x)$ 用于表示对应几何动态系统的势能方程， $\Xi_G(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的第一曲率项矩阵， $\xi_G(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的第二曲率项矩阵， $g_i(x, \dot{x})$ 用于表示 $G(x, \dot{x})$ 中第 i 列的子矩阵， ∂_x 用于表示对状态参数 x 求偏导， $\partial_{\dot{x}}$ 用于表示对状态参数 $\dot{x}$ 求偏导， ∇_x 用于表示对状态参数 x 求梯度， m 用于表示 $G(x, \dot{x})$ 的矩阵总列数，状态参数 $\dot{x}$ 为状态参数 x 的微分，状态参数 $\ddot{x}$ 为状态参数 $\dot{x}$ 的微分；

在此过程中，与位置运动任务对应的状态参数 x 和状态参数 $\dot{x}$ 分别用于表示所述机器人末端的位置信息和位置变化速度信息，与姿态运动任务对应的状态参数 x 和状态参数 $\dot{x}$ 分别用于表示所述机器人末端的姿态信息和姿态变化速度信息，与避障运动任务对应的状态参数 x 和状态参数 $\dot{x}$ 分别用于表示机器人关键部位和对应障碍物之间的相对距离信息和相对运动速度信息。

4. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，每个几何动态系统所对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力的计算公式采用如下式子进行表示：

$$\left\{ \begin{array}{l} M(x, \dot{x}) = G(x, \dot{x}) + \Xi_G(x, \dot{x}) \\ f(x, \dot{x}) = M(x, \dot{x})\ddot{x} = -\nabla_x \Phi(x) - B(x, \dot{x})\dot{x} - \xi_G(x, \dot{x}) \end{array} \right. ;$$

其中， $M(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的局部期望惯性矩阵， $f(x, \dot{x})$ 用于表示对应几何动态系统的与系统状态参数 $(x, \dot{x})$ 对应的局部期望作用力。

5. 根据权利要求 1-4 中任意一项所述的方法，其特征在于，所述基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的期望惯性矩阵和期望作用力传递到所述根节点进行关节加速度求解，得到所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度的步骤，包括：

根据所述 RMP 运动策略映射树内的根节点与各个叶节点之间的空间变换关系，基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到所述根节点处，得到所述根节点在当前

控制周期内的全局期望惯性矩阵和全局期望作用力；

根据所述全局期望惯性矩阵和所述全局期望作用力，计算所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度。

6.根据权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述根据所述全局期望惯性矩阵和所述全局期望作用力，计算所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度的步骤，包括：

根据所述目标机器人的关节极限运动位置区间及关节加速度调控区间，针对所述目标机器人的关节加速度构建目标加速度约束条件；

根据所述全局期望惯性矩阵和所述全局期望作用力，针对所述目标机器人的关节加速度构建对应的加速度误差函数；

10 以最小化所述加速度误差函数的实际输出大小为目的，基于目标加速度约束条件针对关节加速度进行二次规划问题求解，得到所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度。

7.根据权利要求 6 所述的方法，其特征在于，所述目标加速度约束条件采用如下式子进行表示：

$$\max \left(\ddot{q}_l, \frac{2}{\Delta t^2} (q_l - q^* - \dot{q}^* \Delta t) \right) \leq \ddot{q} \leq \min \left(\ddot{q}_u, \frac{2}{\Delta t^2} (q_u - q^* - \dot{q}^* \Delta t) \right);$$

15 其中， q^* 用于表示所述实际关节状态信息包括的实际关节位置， $\dot{q}^*$ 用于表示所述实际关节状态信息包括的实际关节速度， Δt 用于表示单个控制周期的周期时长， q_u 用于表示所述关节极限运动位置区间包括的关节位置上限值， q_l 用于表示所述关节极限运动位置区间包括的关节位置下限值， $\ddot{q}_u$ 用于表示所述关节加速度调控区间包括的关节加速度上限值， $\ddot{q}_l$ 用于表示所述关节加速度调控区间包括的关节加速度下限值， $\ddot{q}$ 用于表示所述目标机器人的关节加速度；

所述加速度误差函数采用如下式子进行表示：

$$20 \quad (M_r \ddot{q} - f_r)^T (M_r \ddot{q} - f_r);$$

其中， M_r 用于表示所述全局期望惯性矩阵， f_r 用于表示所述全局期望作用力；

此时，计算所述期望关节加速度的二次规划问题表达式采用如下式子进行表示：

$$\begin{aligned} \min_{\ddot{q}} \quad & (M_r \ddot{q} - f_r)^T (M_r \ddot{q} - f_r) \\ \text{s.t.} \quad & \max \left(\ddot{q}_l, \frac{2}{\Delta t^2} (q_l - q^* - \dot{q}^* \Delta t) \right) \leq \ddot{q} \leq \min \left(\ddot{q}_u, \frac{2}{\Delta t^2} (q_u - q^* - \dot{q}^* \Delta t) \right). \end{aligned}$$

8.一种机器人避障控制装置，其特征在于，所述装置包括：

25 障碍物确定模块，用于获取目标机器人所在运行环境内当前存在的所有障碍物各自的实际空间位置；

RMP 树构建模块，用于根据获取到的所有障碍物各自的实际空间位置，针对所述目标机器人构建对应的 RMP 运动策略映射树，其中所述 RMP 运动策略映射树的根节点任务与机器人关节空间对应，所述 RMP 运动策略映射树的叶节点任务包括机器人末端执行期望作业的位置运动任务和姿态运动任务，以及包括所述机器人末端的多个机器人关键部位分别针对各个障碍物进行避障的避障运动任务；

5 动态系统构建模块，用于针对所述位置运动任务、所述姿态运动任务和各个所述避障运动任务分别构建涉及速度信息的几何动态系统；

运动参数获取模块，用于获取所述目标机器人在当前控制周期内的实际关节状态信息，以及所述目标机器人的机器人末端在当前控制周期内的与所述期望作业匹配的期望位置信息和期望姿态信息；

10 局部策略求解模块，用于基于 RMP 前推操作将所述实际关节状态信息、所述期望位置信息和所述期望姿态信息从所述 RMP 运动策略映射树的根节点传递到各个叶节点任务的几何动态系统中进行期望惯性矩阵求解和期望作用力求解，得到各个叶节点任务分别对应的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力；

全局策略求解模块，用于基于 RMP 回拉操作将各个叶节点任务的局部期望惯性矩阵和局部期望作用力传递到所述根节点进行关节加速度求解，得到所述目标机器人在当前控制周期内的期望关节加速度；

避障作业控制模块，用于按照所述期望关节加速度控制所述目标机器人进行运动。

15 9.一种机器人控制设备，其特征在于，包括处理器和存储器，所述存储器存储有可被所述处理器执行的计算机程序，所述处理器可执行所述计算机程序，以实现权利要求 1-7 中任意一项所述的机器人避障控制方法。

10.一种可读存储介质，其上存储有计算机程序，其特征在于，所述计算机程序被运行时，实现权利要求 1-7 中任意一项所述的机器人避障控制方法。

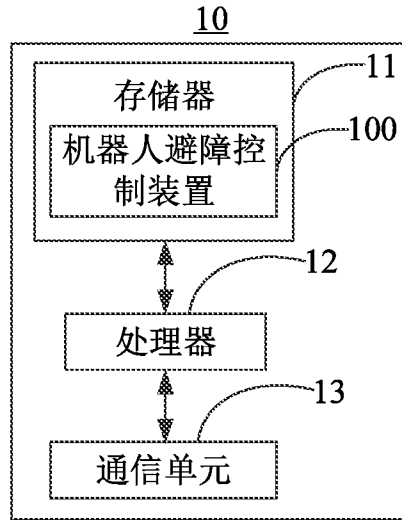


图 1

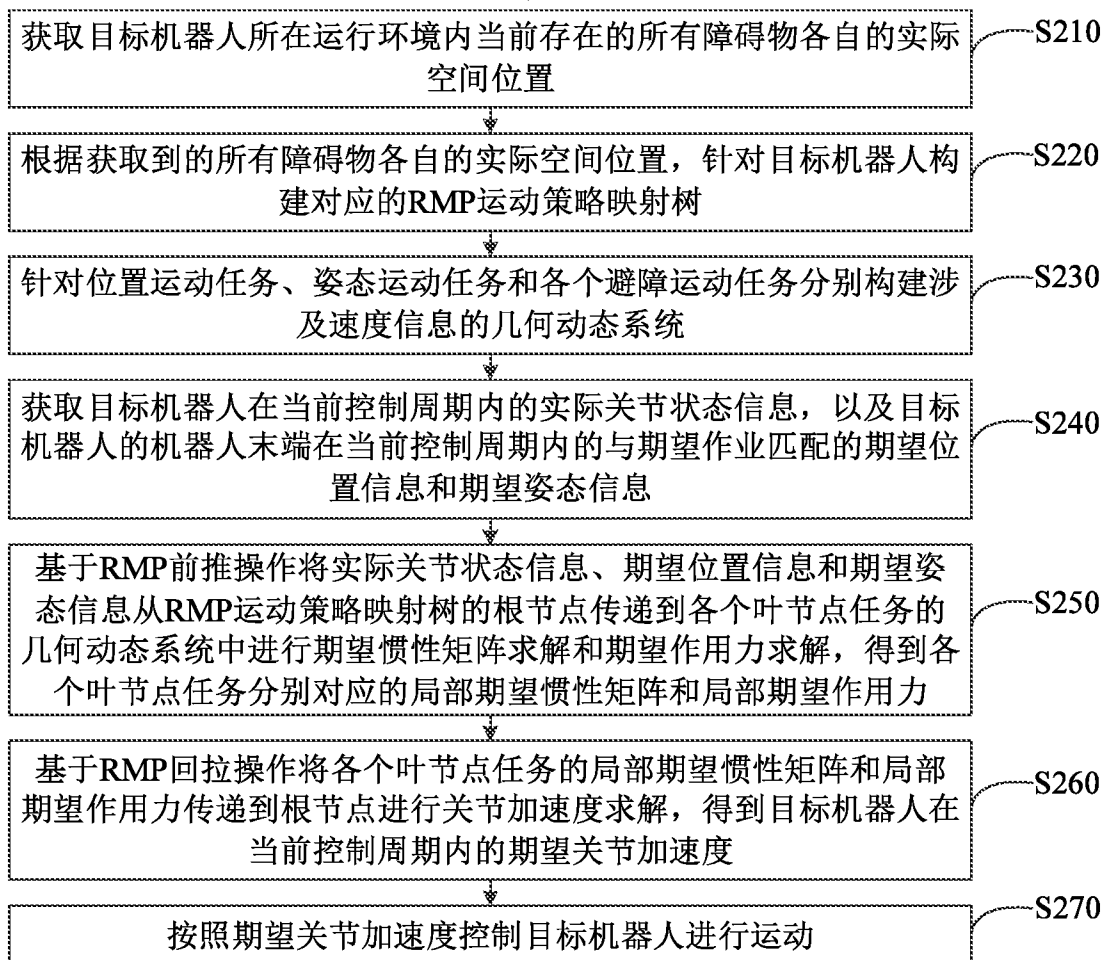


图 2

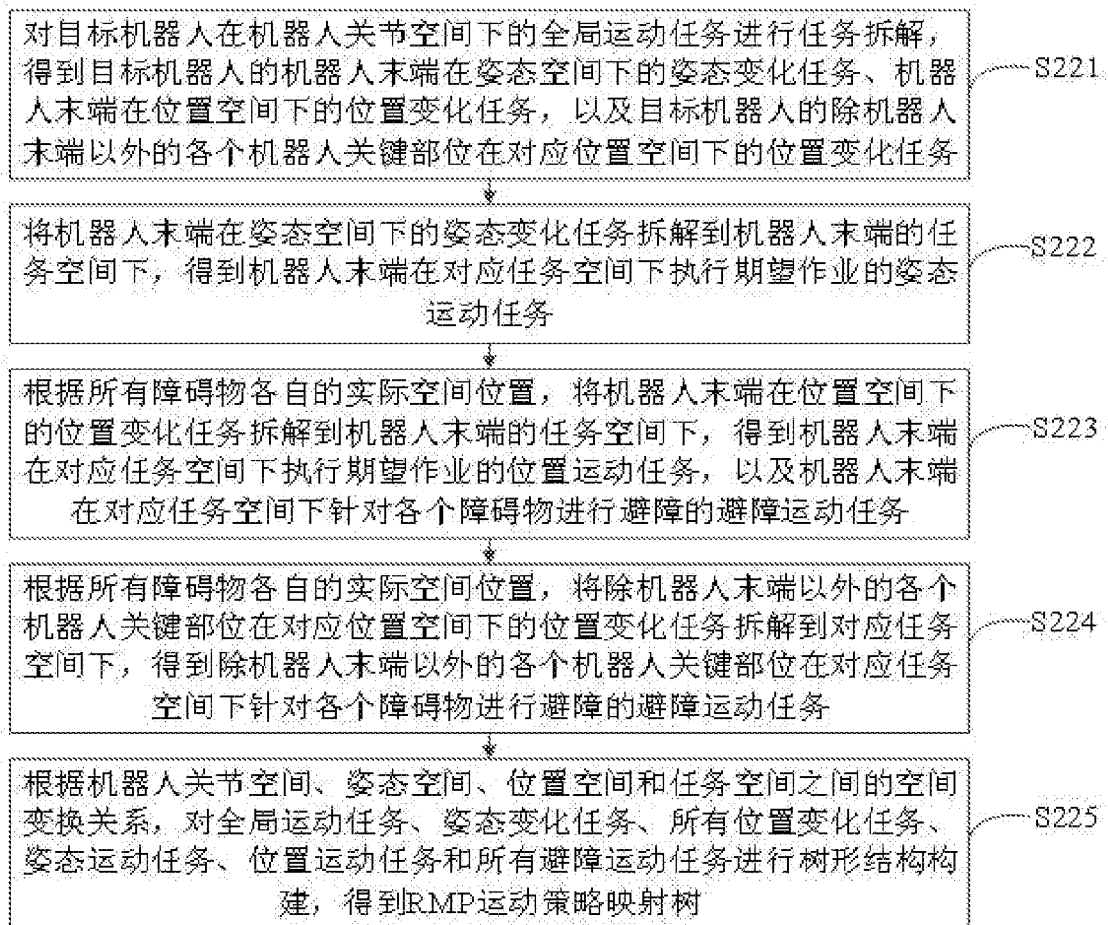


图 3

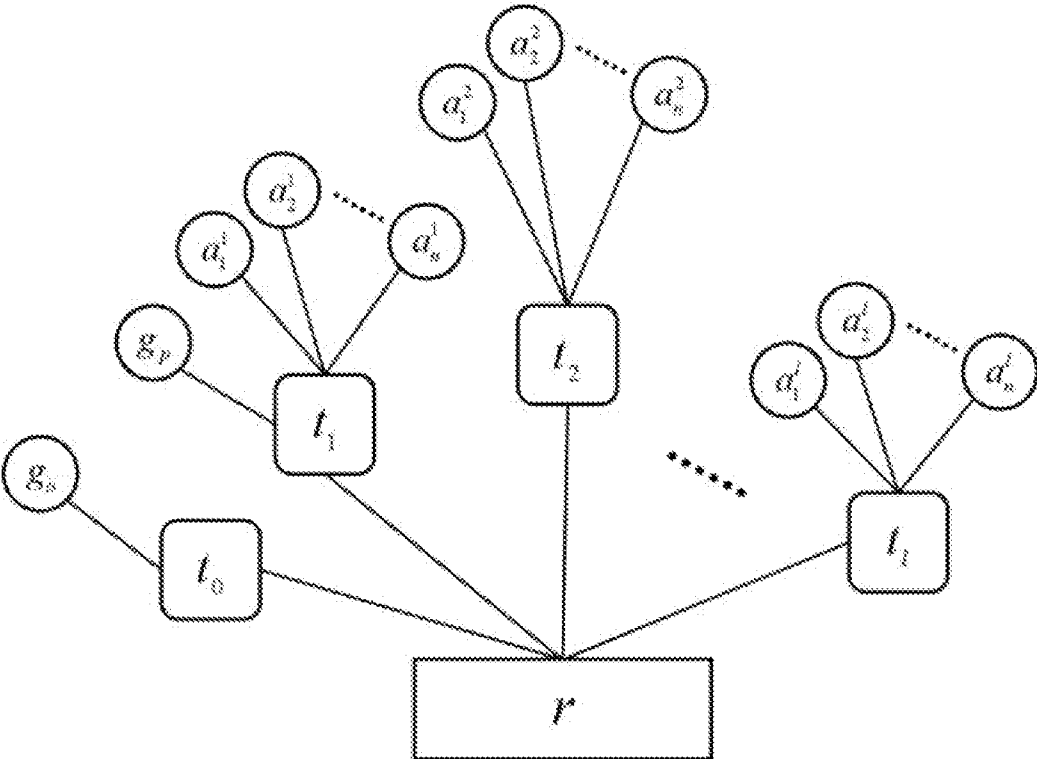


图 4

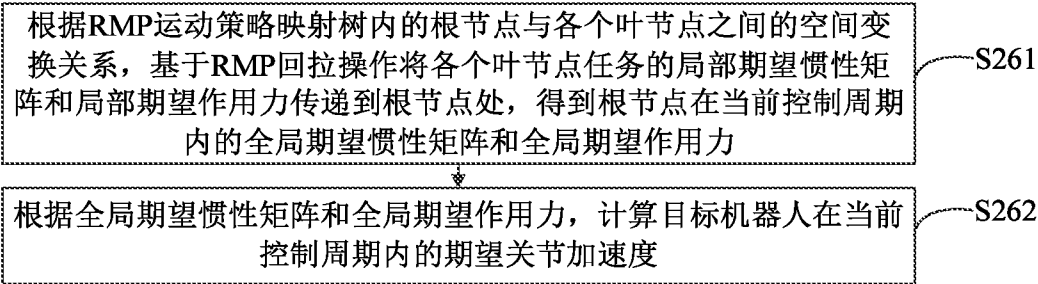


图 5

100

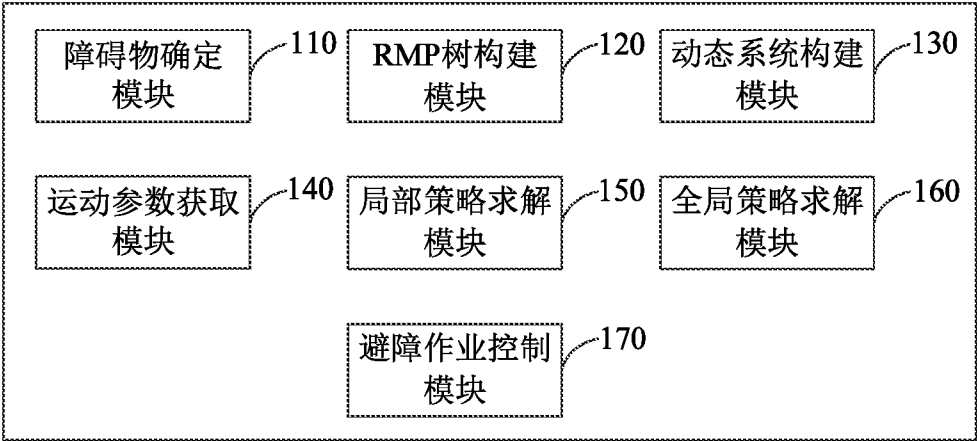


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/142297

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G05D 1/43(2024.01)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) IPC: G05D G05B B25J 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) CNTXT, DWPL, CJFD, WPABS, ENTXT: 深圳市优必选科技股份有限公司, 黎曼运动策略, 避, 障, 机器人, 关节, 位置, 姿态, 加速度, 任务, 映射, 树, ubtech, Riemannian, motion, policies, avoidance, obstacle, robot, joint, position, pose, acceleration, task, map, tree		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 115972196 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 18 April 2023 (2023-04-18) description, paragraphs [0031]-[0079], and figures 1-3	1-10
A	CN 114227686 A (UBTECH ROBOTICS CORP.) 25 March 2022 (2022-03-25) entire document	1-10
A	CN 115179297 A (CAPITAL MEDICAL UNIVERSITY) 14 October 2022 (2022-10-14) entire document	1-10
A	CN 116372923 A (UBTECH ROBOTICS CORP.) 04 July 2023 (2023-07-04) entire document	1-10
A	US 2021122037 A1 (ROBERT BOSCH GMBH) 29 April 2021 (2021-04-29) entire document	1-10
A	US 2022206468 A1 (TWINNY CO., LTD.) 30 June 2022 (2022-06-30) 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 “D” document cited by the applicant in the international application “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 19 August 2024		Date of mailing of the international search report 22 August 2024
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/142297

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	115972196	A	18 April 2023	None			
CN	114227686	A	25 March 2022	None			
CN	115179297	A	14 October 2022	None			
CN	116372923	A	04 July 2023	None			
US	2021122037	A1	29 April 2021	EP	3812972	A1	28 April 2021
				US	11648664	B2	16 May 2023
				KR	20210049689	A	06 May 2021
US	2022206468	A1	30 June 2022	WO	2020213829	A1	22 October 2020
				EP	3957446	A1	23 February 2022
				US	12025970	B2	02 July 2024
				KR	102049962	B1	28 November 2019

A. 主题的分类

G05D 1/43(2024.01)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)

IPC: G05D G05B B25J

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))

CNTEXT, DWPI, CJFD, WPABS, ENTXT: 深圳市优必选科技股份有限公司, 黎曼运动策略, 避障, 机器人, 关节, 位置, 姿态, 加速度, 任务, 映射, 树, ubtech, Riemannian, motion, policies, avoidance, obstacle, robot, joint, position, pose, acceleration, task, map, tree

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 115972196 A (浙江大学) 2023年4月18日 (2023 - 04 - 18) 说明书第[0031]–[0079]段、附图1–3	1–10
A	CN 114227686 A (深圳市优必选科技股份有限公司) 2022年3月25日 (2022 - 03 - 25) 全文	1–10
A	CN 115179297 A (首都医科大学) 2022年10月14日 (2022 - 10 - 14) 全文	1–10
A	CN 116372923 A (深圳市优必选科技股份有限公司) 2023年7月4日 (2023 - 07 - 04) 全文	1–10
A	US 2021122037 A1 (ROBERT BOSCH G.M.B.H.) 2021年4月29日 (2021 - 04 - 29) 全文	1–10
A	US 2022206468 A1 (TWINNY CO., LTD.) 2022年6月30日 (2022 - 06 - 30) 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

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“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

2024年8月19日

国际检索报告邮寄日期

2024年8月22日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

马兵

电话号码 (+86) 010-53962506

PCT/ISA/210 表(第2页) (2022年7月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2023/142297

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	115972196	A	2023年4月18日	无			
CN	114227686	A	2022年3月25日	无			
CN	115179297	A	2022年10月14日	无			
CN	116372923	A	2023年7月4日	无			
US	2021122037	A1	2021年4月29日	EP	3812972	A1	2021年4月28日
				US	11648664	B2	2023年5月16日
				KR	20210049689	A	2021年5月6日
US	2022206468	A1	2022年6月30日	WO	2020213829	A1	2020年10月22日
				EP	3957446	A1	2022年2月23日
				US	12025970	B2	2024年7月2日
				KR	102049962	B1	2019年11月28日