

(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
2022 年 9 月 29 日 (29.09.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/198992 A1

(51) 国际专利分类号:
B25J 9/16 (2006.01) *B25J 18/00* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/124618

(22) 国际申请日: 2021 年 10 月 19 日 (19.10.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110301126.2 2021年3月22日 (22.03.2021) 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学苑大道1001号南山智园
C1栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。

(72) 发明人: 陈金亮 (CHEN, Jinliang); 中国广东省
深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1
栋16、22楼, Guangdong 518000 (CN)。 刘益彰
(LIU, Yizhang); 中国广东省深圳市南山区学苑
大道1001号南山智园C1栋16、22楼, Guangdong
518000 (CN)。 熊友军(XIONG, Youjun); 中国广
东省深圳市南山区学苑大道1001号南山智园C1
栋16、22楼, Guangdong 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, Guangdong 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,

(54) **Title:** METHOD AND APPARATUS FOR PLANNING ROBOT ARM MOTION, AND READABLE STORAGE MEDIUM AND ROBOT ARM

(54) 发明名称: 一种机械臂运动规划方法、装置、可读存储介质及机械臂

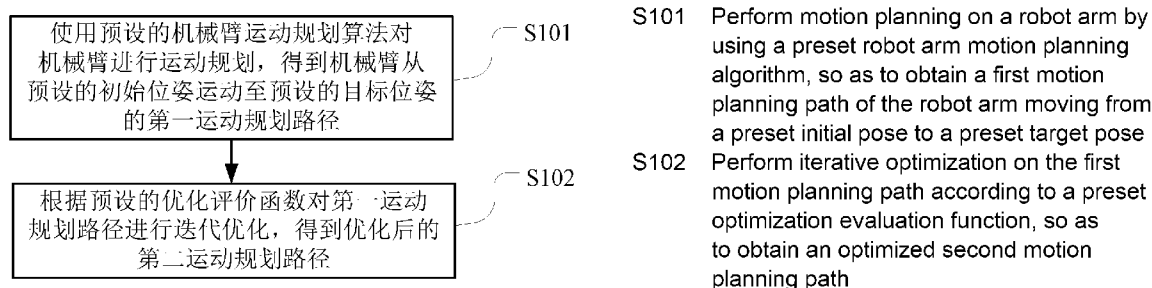


图 1

(57) **Abstract:** The present application belongs to the technical field of robots, and in particular relates to a method and apparatus for planning robot arm motion, and a computer-readable storage medium and a robot arm. The method comprises: performing motion planning on a robot arm by using a preset robot arm motion planning algorithm, so as to obtain a first motion planning path of the robot arm moving from a preset initial pose to a preset target pose; and performing iterative optimization on the first motion planning path according to a preset optimization evaluation function, so as to obtain an optimized second motion planning path. By means of the present application, an optimization evaluation function for evaluating a motion planning path is constructed, and on the basis of the optimization evaluation function, iterative optimization is performed on a first motion planning path that is obtained by means of initial planning, such that a second motion planning path, which is more approximate to the optimal path, is obtained.

(57) **摘要:** 本申请属于机器人技术领域, 尤其涉及一种机械臂运动规划方法、装置、计算机可读存储介质及机械臂。所述方法包括: 使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划, 得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径; 根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化, 得到优化后的第二运动规划路径。通过本申请, 构建了对运动规划路径进行评价的优化评价函数, 基于这一优化评价函数对初始规划得到的第一运动规划路径进行迭代优化, 从而得到更加趋近于最优路径的第二运动规划路径。

BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (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))。

一种机械臂运动规划方法、装置、可读存储介质及机械臂

本申请要求于 2021 年 03 月 22 日在中国专利局提交的、申请号为 202110301126.2 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

5 本申请属于机器人技术领域，尤其涉及一种机械臂运动规划方法、装置、计算机可读存储介质及机械臂。

背景技术

在现有技术中，一般是使用快速扩展随机树 (Rapidly-exploring Random Trees, RRT) 或者双向快速扩展随机树 (Bi-directional RRT, BiRRT) 等规划算法对机械臂进行运动规划。但这些算法都具有很强的随机性，所得到的运动规划路径往往与最优路径存在较大的差距。

技术问题

有鉴于此，本申请实施例提供了一种机械臂运动规划方法、装置、计算机可读存储介质及机械臂，以解决现有的机械臂运动规划方法所得到的运动规划路径往往与最优路径存在较大的差距的问题。

技术方案

本申请实施例的第一方面提供了一种机械臂运动规划方法，可以包括：

使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径；

20 根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径。

进一步地，所述根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径，可以包括：

将所述第一运动规划路径作为当前规划路径；

25 根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度；

根据当前规划路径的梯度对所述当前规划路径进行更新计算，得到更新规划路径；

若所述当前规划路径的梯度不满足预设的迭代终止条件，则将所述更新规划路径作为新的当前规划路径，并返回执行所述根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度的步骤及其后续步骤；

30 若所述当前规划路径的梯度满足所述迭代终止条件，则将所述更新规划路径确定为优化后的第二运动规划路径。

进一步地, 所述优化评价函数可以为:

$$f(x) = \|Kx + e\|^2 = x^T Ax + 2x^T Ke + e^T e$$

$$K = \begin{bmatrix} I_N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -I_N & I_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -I_N & I_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -I_N & I_N \end{bmatrix}$$

其中, e 为与所述初始位姿对应的矩阵, 且 $e = [Q_0^T, 0, \dots, 0]^T$, Q_0 为所述初始位姿,

5 K 为预设的微分算子矩阵, I_N 为预设的微分算子, A 为所述优化评价函数的黑塞矩阵, 且 $A = K^T K$, x 为所述机械臂的运动规划路径, $f(x)$ 为所述优化评价函数。

进一步地, 所述根据当前规划路径的梯度对所述当前规划路径进行更新计算, 得到更新规划路径, 可以包括:

根据下式对所述当前规划路径进行更新计算:

$$10 \quad x_{i+1} = x_i - \eta * \nabla x_i$$

其中, x_i 为所述当前规划路径, ∇x_i 为所述当前规划路径的梯度, η 为预设的更新步长, x_{i+1} 为所述更新规划路径。

进一步地, 所述根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度, 可以包括:

根据下式计算所述当前规划路径的梯度:

$$15 \quad \nabla x_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}。$$

进一步地, 所述迭代终止条件可以为: 所述当前规划路径的梯度小于预设的梯度阈值, 或迭代优化时长大于预设的时长阈值。

进一步地, 所述机械臂运动规划算法可以为快速扩展随机树规划算法或双向快速扩展随机树规划算法。

20 本申请实施例的第二方面提供了一种机械臂运动规划装置, 可以包括:

运动规划模块, 用于使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划, 得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径;

迭代优化模块, 用于根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化, 得到优化后的第二运动规划路径。

25 进一步地, 所述迭代优化模块可以包括:

当前规划路径确定单元, 用于将所述第一运动规划路径作为当前规划路径;

梯度计算单元，用于根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度；

更新计算单元，用于根据当前规划路径的梯度对所述当前规划路径进行更新计算，得到更新规划路径；

5 当前规划路径更新单元，用于若所述当前规划路径的梯度不满足预设的迭代终止条件，则将所述更新规划路径作为新的当前规划路径；

第二运动规划路径确定单元，用于若所述当前规划路径的梯度满足所述迭代终止条件，则将所述更新规划路径确定为优化后的第二运动规划路径。

进一步地，所述优化评价函数为：

$$f(x) = \|Kx + e\|^2 = x^T Ax + 2x^T Ke + e^T e$$

$$K = \begin{bmatrix} I_N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -I_N & I_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -I_N & I_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -I_N & I_N \end{bmatrix}$$

10 其中， e 为与所述初始位姿对应的矩阵，且 $e = [Q_0^T, 0, \dots, 0]^T$ ， Q_0 为所述初始位姿， K 为预设的微分算子矩阵， I_N 为预设的微分算子， A 为所述优化评价函数的黑塞矩阵，且 $A = K^T K$ ， x 为所述机械臂的运动规划路径， $f(x)$ 为所述优化评价函数。

进一步地，所述更新计算单元具体用于根据下式对所述当前规划路径进行更新计算：

$$15 \quad x_{i+1} = x_i - \eta * \nabla x_i$$

其中， x_i 为所述当前规划路径， ∇x_i 为所述当前规划路径的梯度， η 为预设的更新步长， x_{i+1} 为所述更新规划路径。

进一步地，所述梯度计算单元具体用于根据下式计算所述当前规划路径的梯度：

$$\nabla x_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}。$$

20 进一步地，所述迭代终止条件为：所述当前规划路径的梯度小于预设的梯度阈值，或迭代优化时长大于预设的时长阈值。

进一步地，所述机械臂运动规划算法为快速扩展随机树规划算法或双向快速扩展随机树规划算法。

25 本申请实施例的第三方面提供了一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时实现上述任一种机械臂运动规划方法的步骤。

本申请实施例的第四方面提供了一种机械臂，包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述计算机程序时实现上述任一种机械臂运动规划方法的步骤。

5 本申请实施例的第五方面提供了一种计算机程序产品，当计算机程序产品在机械臂上运行时，使得机械臂执行上述任一种机械臂运动规划方法的步骤。

有益效果

本申请实施例与现有技术相比存在的有益效果是：本申请实施例使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径；根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径。通过本申请实施例，构建了对运动规划路径进行评价的优化评价函数，基于这一优化评价函数对初始规划得到的运动规划路径（即第一运动规划路径）进行迭代优化，从而得到更加趋近于最优路径的运动规划路径（即第二运动规划路径）。

10

附图说明

15 为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例，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它的附图。

图 1 为本申请实施例中一种机械臂运动规划方法的一个实施例流程图；

20 图 2 为根据预设的优化评价函数对第一运动规划路径进行迭代优化的示意图；

图 3 为第一运动规划路径和第二运动规划路径的对比示意图；

图 4 为本申请实施例中一种机械臂运动规划装置的一个实施例结构图；

图 5 为本申请实施例中一种机械臂的示意框图。

本发明的实施方式

25 为使得本申请的发明目的、特征、优点能够更加的明显和易懂，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，下面所描述的实施例仅仅是本申请一部分实施例，而非全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例，都属于本申请保护的范围。

30 应当理解，当在本说明书和所附权利要求书中使用时，术语“包括”指示所描述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在，但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。

还应当理解，在此本申请说明书中所使用的术语仅仅是出于描述特定实施例的目的而并不意在限制本申请。如在本申请说明书和所附权利要求书中所使用的那样，除非上下文清楚地指明其它情况，否则单数形式的“一”、“一个”及“该”意在包括复数形式。

还应当进一步理解，在本申请说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相
5 关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合，并且包括这些组合。

如在本说明书和所附权利要求书中所使用的那样，术语“如果”可以依据上下文被解释为“当...时”或“一旦”或“响应于确定”或“响应于检测到”。类似地，短语“如果确定”或“如果检测到[所描述条件或事件]”可以依据上下文被解释为意指“一旦确定”或“响应于确定”或“一旦检测到[所描述条件或事件]”或“响应于检测到[所描述条件或
10 事件]”。

另外，在本申请的描述中，术语“第一”、“第二”、“第三”等仅用于区分描述，而不能理解为指示或暗示相对重要性。

请参阅图 1，本申请实施例中一种机械臂运动规划方法的一个实施例可以包括：

步骤 S101、使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到机械臂从预
15 设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径。

在本申请实施例中，可以通过位姿空间（configuration space）描述机械臂所有关节的位姿构成的集合，即 C 空间，而当考虑机械臂和障碍物时，C 空间会分为两个空间，即障碍物空间 C_{Obs} 和自由空间 C_{free} 。

其中， C_{Obs} 可以用下式进行描述：

$$C_{Obs} = \{q \in C \mid Robot(q) \cap Obs \neq \emptyset\}$$

即 C_{Obs} 为满足以下条件的位姿构成的集合：该位姿（即 q）属于 C 空间且在该位姿下的机械臂（即 Robot(q)）与障碍物（即 Obs）相交不为空，两者发生碰撞。

相应地， C_{free} 可以用下式进行描述：

$$C_{free} = C - C_{Obs}$$

25 即 C_{free} 为 C_{Obs} 的补集。

C_{free} 是机械臂能够在其中运动并发现轨迹最优、时间最短的可选区域。机械臂运动规划算法的基本思想是基于 C_{free} 建立用于解决机械臂运动规划问题的路径图，其具体流程可以包括：

- (1) 确定机械臂的工作空间 W；
- 30 (2) 确定工作空间 W 中的障碍物 Obs 以及机械臂 Robot；
- (3) 确定机械臂对应的 C 空间，以及障碍物空间 C_{Obs} 和自由空间 C_{free} ；

(4) 确定机械臂的初始位姿 Q_{init} 和目标位姿 Q_{end} ;

(5) 在自由空间 C_{free} 中根据机械臂运动规划算法采样获得机械臂的无碰撞路径 τ , 该路径需满足 $\tau[0, h] \rightarrow C_{free}$, 其中, 0 表示运动规划的起始时间点, h 表示运动规划的终止时间点, 该路径在从起始时间点至终止时间点之间的任意一个规划时间点时的机械臂位姿均处在自由空间 C_{free} 的范围内, 且该路径在起始时间点时的机械臂位姿为初始位姿, 即 $\tau[0] = Q_{init}$, 该路径在终止时间点时的机械臂位姿为目标位姿, 即 $\tau[h] = Q_{end}$ 。

在本申请实施例中, 可以使用现有技术中的任意一种机械臂运动规划算法来对机械臂进行运动规划, 包括但不限于 RRT 或 BiRRT 等具体的规划算法。由于这些算法都具有很强的随机性, 所得到的运动规划路径往往与最优路径存在较大的差距, 因此需要通过后续步骤对其进行优化处理。为了便于区分, 此处将此时的运动规划路径记为第一运动规划路径。

步骤 S102、根据预设的优化评价函数对第一运动规划路径进行迭代优化, 得到优化后的第二运动规划路径。

在本申请实施例中, 可以将机械臂的运动规划路径定义为 $(h+1) \times (n+1)$ 维的矩阵, 即 $x = [Q_0^T, Q_1^T, \dots, Q_h^T]^T$, 其中, 右下标的 0, 1, ..., h 表示从起始时间点至终止时间点之间的各个规划时间点, Q 表示某个规划时间点的机械臂位姿, 可以用机械臂的各个关节角所构成的向量进行表示, 即: $Q = [q_0, q_1, \dots, q_n]^T$, 其中, n+1 表示机械臂的运动自由度, $q_0, q_1, \dots, q_n$ 分别为机械臂的各个关节角。

为了衡量机械臂的运动规划路径的优劣, 在本申请实施例中引入了优化评价函数 $f(x)$ 来对机械臂的运动规划路径进行评价, 具体地, 可以将机械臂的各个关节角运动的欧式距离的平方和作为优化评价函数, 即:

$$f(x) = \sum_{t=0}^{h-1} (Q_{t+1} - Q_t)^2$$

在实际计算过程中, 可以将该优化评价函数转化为如下形式:

$$f(x) = \|Kx + e\|^2 = x^T Ax + 2x^T Ke + e^T e$$

$$K = \begin{bmatrix} I_N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -I_N & I_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -I_N & I_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -I_N & I_N \end{bmatrix}$$

其中, e 为与初始位姿对应的矩阵, 且 $e = [Q_0^T, 0, \dots, 0]^T \in R^{(h+1) \times (n+1)}$, Q_0 为初始位

姿，也即 Q_{init} ， K 为预设的微分算子矩阵， I_N 为预设的微分算子，且 $I_N = \frac{df(x)}{dx}$ ， A 为优化评价函数的黑塞矩阵 (Hessian Matrix)，且 $A = K^T K$ 。

通过该优化评价函数，可以将机械臂的运动规划的评价问题转化为非凸优化问题，即机械臂运动规划算法采样扩展时在满足关节构型约束与末端执行器约束，关节限位约束与障碍物避碰约束的同时，获得局部最优路径，使得优化评价函数趋近最小值，或者说使机械臂从初始位姿运动至目标位姿的运动规划路径趋近于最优路径，即： $\operatorname{argmin}_x(f(x))$ 。

为了使得运动规划路径趋近于最优路径，在本申请实施例中可以通过如图 2 所示的过程对第一运动规划路径进行迭代优化：

步骤 S1021、将第一运动规划路径作为当前规划路径。

10 步骤 S1022、根据优化评价函数计算当前规划路径的梯度。

具体地，可以根据下式计算当前规划路径的梯度：

$$\nabla x_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}$$

其中， x_i 为当前规划路径， ∇x_i 为当前规划路径的梯度， $\frac{\partial f(x)}{\partial x_i}$ 为与 x_i 对应的偏导数。

15 步骤 S1023、根据当前规划路径的梯度对当前规划路径进行更新计算，得到更新规划路径。

具体地，可以根据下式对当前规划路径进行更新计算：

$$x_{i+1} = x_i - \eta * \nabla x_i$$

其中， η 为预设的更新步长，其具体取值可以根据实际情况进行设置， x_{i+1} 为更新规划路径。

20 步骤 S1024、判断当前规划路径的梯度是否满足预设的迭代终止条件。

在本申请实施例中，迭代终止条件可以为：当前规划路径的梯度小于预设的梯度阈值，或迭代优化时长大于预设的时长阈值。其中，梯度阈值和时长阈值的具体取值均可以根据实际情况进行设置。

25 若当前规划路径的梯度不满足预设的迭代终止条件，则执行步骤 S1025，若当前规划路径的梯度满足迭代终止条件，则执行步骤 S1026。

步骤 S1025、将更新规划路径作为新的当前规划路径。

在执行步骤 S1025 之后，返回执行步骤 S1022 及其后续步骤，即进行新一轮的迭代优化。

步骤 S1026、将更新规划路径确定为优化后的运动规划路径。

为了便于区分，此处将优化后的运动规划路径记为第二运动规划路径。图 3 所示即为第一运动规划路径和第二运动规划路径的对比示意图，从中可以看出，第二运动规划路径较之于第一运动规划路径更加趋近于最优路径。

综上，本申请实施例使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径；根据预设的优化评价函数对第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径。通过本申请实施例，构建了对运动规划路径进行评价的优化评价函数，基于这一优化评价函数对初始规划得到的运动规划路径（即第一运动规划路径）进行迭代优化，从而得到更加趋近于最优路径的运动规划路径（即第二运动规划路径）。

应理解，上述实施例中各步骤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，而不对本申请实施例的实施过程构成任何限定。

对应于上文实施例所述的一种机械臂运动规划方法，图 4 示出了本申请实施例提供的一种机械臂运动规划装置的一个实施例结构图。

本实施例中，一种机械臂运动规划装置可以包括：

运动规划模块 401，用于使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径；

迭代优化模块 402，用于根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径。

进一步地，所述迭代优化模块可以包括：

当前规划路径确定单元，用于将所述第一运动规划路径作为当前规划路径；

梯度计算单元，用于根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度；

更新计算单元，用于根据当前规划路径的梯度对所述当前规划路径进行更新计算，得到更新规划路径；

当前规划路径更新单元，用于若所述当前规划路径的梯度不满足预设的迭代终止条件，则将所述更新规划路径作为新的当前规划路径；

第二运动规划路径确定单元，用于若所述当前规划路径的梯度满足所述迭代终止条件，则将所述更新规划路径确定为优化后的第二运动规划路径。

进一步地，所述优化评价函数为：

$$f(x) = \|Kx + e\|^2 = x^T Ax + 2x^T Ke + e^T e$$

$$K = \begin{bmatrix} I_N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -I_N & I_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -I_N & I_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -I_N & I_N \end{bmatrix}$$

其中, e 为与所述初始位姿对应的矩阵, 且 $e = [Q_0^T, 0, \dots, 0]^T$, Q_0 为所述初始位姿, K 为预设的微分算子矩阵, I_N 为预设的微分算子, A 为所述优化评价函数的黑塞矩阵, 且 $A = K^T K$, x 为所述机械臂的运动规划路径, $f(x)$ 为所述优化评价函数。

5 进一步地, 所述更新计算单元具体用于根据下式对所述当前规划路径进行更新计算:

$$x_{i+1} = x_i - \eta * \nabla x_i$$

其中, x_i 为所述当前规划路径, ∇x_i 为所述当前规划路径的梯度, η 为预设的更新步长, x_{i+1} 为所述更新规划路径。

进一步地, 所述梯度计算单元具体用于根据下式计算所述当前规划路径的梯度:

$$\nabla x_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}。$$

10

进一步地, 所述迭代终止条件为: 所述当前规划路径的梯度小于预设的梯度阈值, 或迭代优化时长大于预设的时长阈值。

进一步地, 所述机械臂运动规划算法为快速扩展随机树规划算法或双向快速扩展随机树规划算法。

15 所属领域的技术人员可以清楚地了解到, 为描述的方便和简洁, 上述描述的装置, 模块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。

在上述实施例中, 对各个实施例的描述都各有侧重, 某个实施例中没有详述或记载的部分, 可以参见其它实施例的相关描述。

20 图 5 示出了本申请实施例提供的一种机械臂的示意框图, 为了便于说明, 仅示出了与本申请实施例相关的部分。

如图 5 所示, 该实施例的机械臂 5 包括: 处理器 50、存储器 51 以及存储在所述存储器 51 中并可在所述处理器 50 上运行的计算机程序 52。所述处理器 50 执行所述计算机程序 52 时实现上述各个机械臂运动规划方法实施例中的步骤, 例如图 1 所示的步骤 S101 至步骤 S102。或者, 所述处理器 50 执行所述计算机程序 52 时实现上述各装置实施例中各模块/单元的功能, 例如图 4 所示模块 401 至模块 402 的功能。

25 示例性的, 所述计算机程序 52 可以被分割成一个或多个模块/单元, 所述一个或者多

一个模块/单元被存储在所述存储器 51 中，并由所述处理器 50 执行，以完成本申请。所述一个或多个模块/单元可以是能够完成特定功能的一系列计算机程序指令段，该指令段用于描述所述计算机程序 52 在所述机械臂 5 中的执行过程。

本领域技术人员可以理解，图 5 仅仅是机械臂 5 的示例，并不构成对机械臂 5 的限定，
5 可以包括比图示更多或更少的部件，或者组合某些部件，或者不同的部件，例如所述机械臂 5 还可以包括输入输出设备、网络接入设备、总线等。

所述处理器 50 可以是中央处理单元（Central Processing Unit，CPU），还可以是其它通用处理器、数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）、专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit，ASIC）、现场可编程门阵列
10 （Field-Programmable Gate Array，FPGA）或者其它可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。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。

所述存储器 51 可以是所述机械臂 5 的内部存储单元，例如机械臂 5 的硬盘或内存。所述存储器 51 也可以是所述机械臂 5 的外部存储设备，例如所述机械臂 5 上配备的插接式硬
15 盘，智能存储卡（Smart Media Card，SMC），安全数字（Secure Digital，SD）卡，闪存卡（Flash Card）等。进一步地，所述存储器 51 还可以既包括所述机械臂 5 的内部存储单元也包括外部存储设备。所述存储器 51 用于存储所述计算机程序以及所述机械臂 5 所需的其它程序和数据。所述存储器 51 还可以用于暂时地存储已经输出或者将要输出的数据。

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，仅以上述各功能单
20 元、模块的划分进行举例说明，实际应用中，可以根据需要而将上述功能分配由不同的功能单元、模块完成，即将所述装置的内部结构划分成不同的功能单元或模块，以完成以上描述的全部或者部分功能。实施例中的各功能单元、模块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。另外，各功能
25 单元、模块的具体名称也只是为了便于相互区分，并不用于限制本申请的保护范围。上述系统中单元、模块的具体工作过程，可以参考前述方法实施例中的对应过程，在此不再赘述。

在上述实施例中，对各个实施例的描述都各有侧重，某个实施例中没有详述或记载的部分，可以参见其它实施例的相关描述。

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
30 算法步骤，能够以电子硬件、或者计算机软件和电子硬件的结合来实现。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申请的范围。

在本申请所提供的实施例中，应该理解到，所揭露的装置/机械臂和方法，可以通过其它的方式实现。例如，以上所描述的装置/机械臂实施例仅仅是示意性的，例如，所述模块或单元的划分，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。另一点，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通讯连接可以通过一些接口，装置或单元的间接耦合或通讯连接，可以是电性，机械或其它的形式。

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实施例方案的目的。

另外，在本申请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。

所述集成的模块/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时，可以存储在一个计算机可读存储介质中。基于这样的理解，本申请实现上述实施例方法中的全部或部分流程，也可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成，所述的计算机程序可存储于一计算机可读存储介质中，该计算机程序在被处理器执行时，可实现上述各个方法实施例的步骤。其中，所述计算机程序包括计算机程序代码，所述计算机程序代码可以为源代码形式、对象代码形式、可执行文件或某些中间形式等。所述计算机可读存储介质可以包括：能够携带所述计算机程序代码的任何实体或装置、记录介质、U 盘、移动硬盘、磁碟、光盘、计算机存储器、只读存储器（ROM，Read-Only Memory）、随机存取存储器（RAM，Random Access Memory）、电载波信号、电信信号以及软件分发介质等。需要说明的是，所述计算机可读存储介质包含的内容可以根据司法管辖区内立法和专利实践的要求进行适当的增减，例如在某些司法管辖区，根据立法和专利实践，计算机可读存储介质不包括电载波信号和电信信号。

以上所述实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围，均应包含在本申请的保护范围之内。

权利要求书

1. 一种机械臂运动规划方法，其特征在于，包括：

使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径；

5 根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径。

2. 根据权利要求 1 所述的机械臂运动规划方法，其特征在于，所述根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径，包括：

将所述第一运动规划路径作为当前规划路径；

10 根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度；

根据当前规划路径的梯度对所述当前规划路径进行更新计算，得到更新规划路径；

若所述当前规划路径的梯度不满足预设的迭代终止条件，则将所述更新规划路径作为新的当前规划路径，并返回执行所述根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度的步骤及其后续步骤；

15 若所述当前规划路径的梯度满足所述迭代终止条件，则将所述更新规划路径确定为优化后的第二运动规划路径。

3. 根据权利要求 2 所述的机械臂运动规划方法，其特征在于，所述优化评价函数为：

$$f(x) = \|Kx + e\|^2 = x^T A x + 2x^T K e + e^T e$$

$$K = \begin{bmatrix} I_N & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -I_N & I_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -I_N & I_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -I_N & I_N \end{bmatrix}$$

20 其中， e 为与所述初始位姿对应的矩阵，且 $e = [Q_0^T, 0, \dots, 0]^T$ ， Q_0 为所述初始位姿， K 为预设的微分算子矩阵， I_N 为预设的微分算子， A 为所述优化评价函数的黑塞矩阵，且 $A = K^T K$ ， x 为所述机械臂的运动规划路径， $f(x)$ 为所述优化评价函数。

4. 根据权利要求 2 所述的机械臂运动规划方法，其特征在于，所述根据当前规划路径的梯度对所述当前规划路径进行更新计算，得到更新规划路径，包括：

25 根据下式对所述当前规划路径进行更新计算：

$$x_{i+1} = x_i - \eta * \nabla x_i$$

其中， x_i 为所述当前规划路径， ∇x_i 为所述当前规划路径的梯度， η 为预设的更新步长， x_{i+1} 为所述更新规划路径。

5. 根据权利要求 2 所述的机械臂运动规划方法，其特征在于，所述根据所述优化评价函数计算所述当前规划路径的梯度，包括：

根据下式计算所述当前规划路径的梯度：

$$\nabla x_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}$$

5 其中， $f(x)$ 为所述优化评价函数， x_i 为所述当前规划路径， ∇x_i 为所述当前规划路径的梯度。

6. 根据权利要求 2 所述的机械臂运动规划方法，其特征在于，所述迭代终止条件为：所述当前规划路径的梯度小于预设的梯度阈值，或迭代优化时长大于预设的时长阈值。

7. 根据权利要求 1 至 6 中任一项所述的机械臂运动规划方法，其特征在于，所述机械臂运动规划算法为快速扩展随机树规划算法或双向快速扩展随机树规划算法。

8. 一种机械臂运动规划装置，其特征在于，包括：

运动规划模块，用于使用预设的机械臂运动规划算法对机械臂进行运动规划，得到所述机械臂从预设的初始位姿运动至预设的目标位姿的第一运动规划路径；

15 迭代优化模块，用于根据预设的优化评价函数对所述第一运动规划路径进行迭代优化，得到优化后的第二运动规划路径。

9. 一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质存储有计算机程序，其特征在于，所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求 1 至 7 中任一项所述的机械臂运动规划方法的步骤。

10. 一种机械臂，包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序，其特征在于，所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求 1 至 7 中任一项所述的机械臂运动规划方法的步骤。

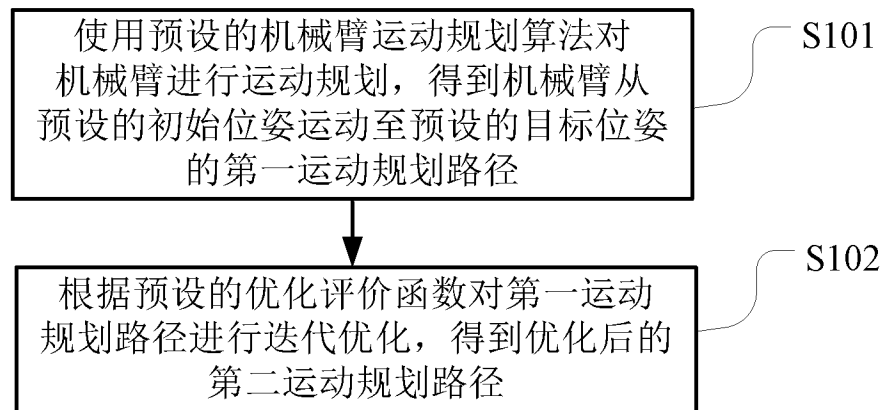


图 1

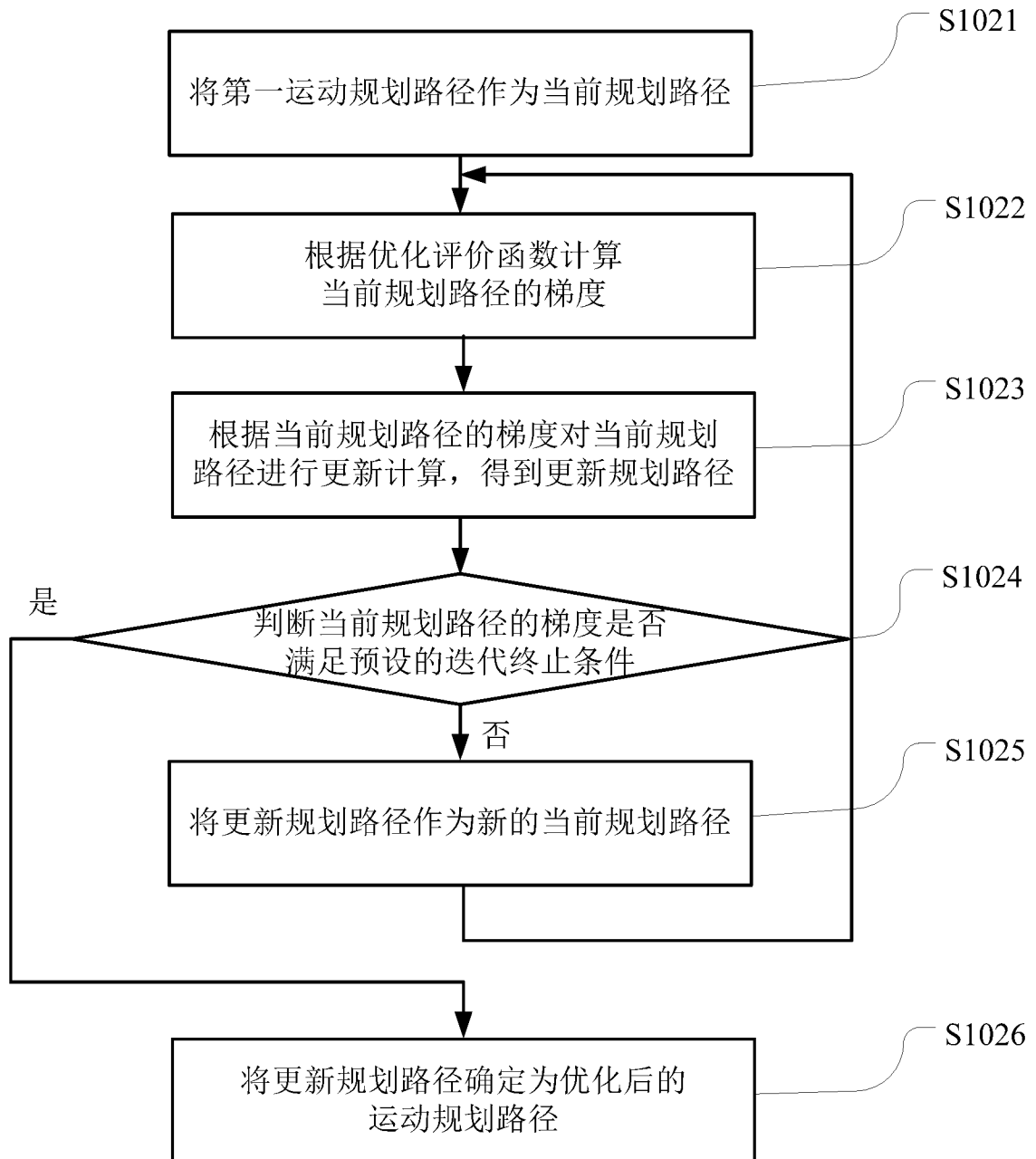


图 2

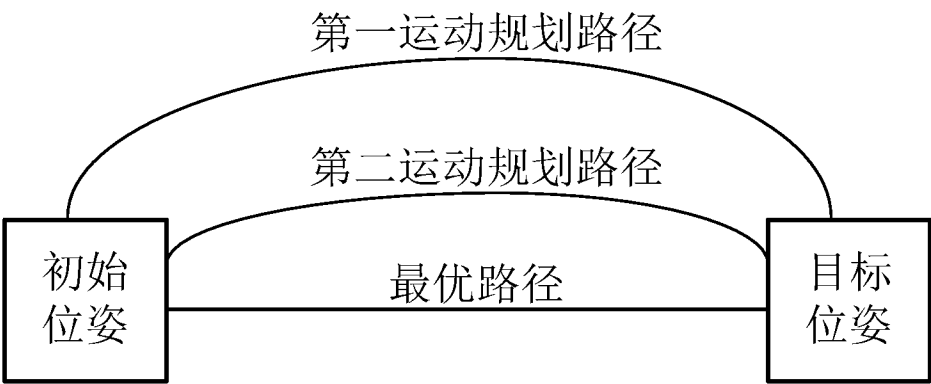


图 3

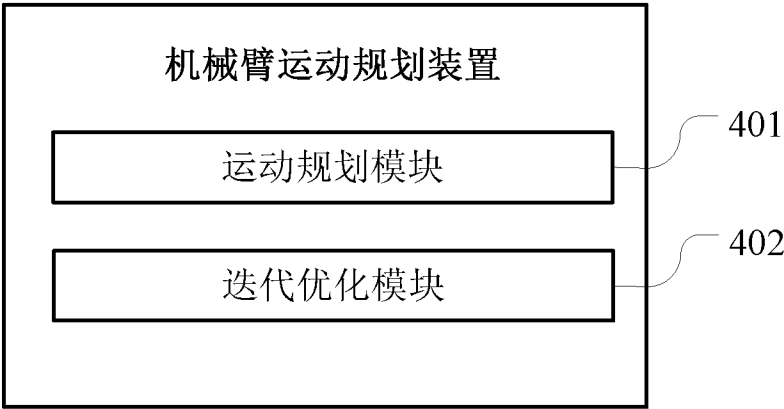


图 4

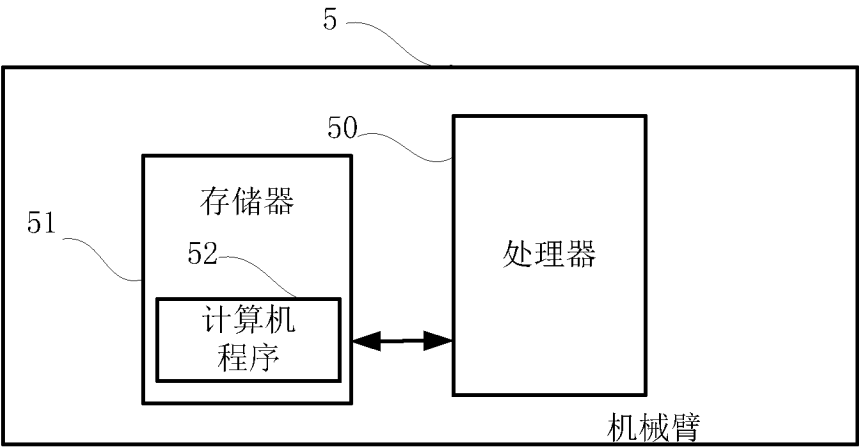


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/124618

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 9/16(2006.01)i; B25J 18/00(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)

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)

WPI; EPODOC; CNPAT; CNKI: 机械臂, 机器人, 路径规划, 运动规划, 优化, 迭代, 梯度, 收敛, 关节角, 转角, 角度, 终止, 条件, 阈值, robot, arm, manipulator, path, mov+, plan+, track, updat+, grad+, convergence, optimiz+, joint, condition, terminat+, end+.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 113119114 A (UBTECH ROBOTICS CORP.) 16 July 2021 (2021-07-16) description, paragraphs 0063-0141, and figures 1-5	1-10
X	CN 110640736 A (NANJING TECH UNIVERSITY) 03 January 2020 (2020-01-03) description, paragraphs 0031-0048, and figures 1-2	1, 7-10
Y	CN 110640736 A (NANJING TECH UNIVERSITY) 03 January 2020 (2020-01-03) description, paragraphs 0031-0048, and figures 1-2	2, 4-6
Y	章婷等 (ZHANG, Ting et al.). "Application of Optimizing the Robot Manipulator's Path with Mixed Chaos" <i>Development & Innovation of Machinery & Electrical Products</i> , Vol. 20, No. 04, 28 July 2007 (2007-07-28), ISSN: 1002-6673, pages 14-15 and 17	2, 4-6
A	CN 112091979 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 18 December 2020 (2020-12-18) 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

14 December 2021

Date of mailing of the international search report

18 January 2022

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

International application No.

PCT/CN2021/124618

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 109895097 A (NINGBO KAIDE TECHNOLOGY SERVICE CO., LTD.) 18 June 2019 (2019-06-18) entire document	1-10
A	CN 111629867 A (PILZ GMBH & CO. KG) 04 September 2020 (2020-09-04) entire document	1-10
A	黄文炳等 (HUANG, Wenbing et al.). "PLANNING METHOD CONSIDERING THE KINETIC CHARACTERISTICS OF THE END EFFECTOR OF A REDUNDANT MANIPULATOR" 清华大学学报 (自然科学版) (<i>Journal of Tsinghua University (Science and Technology)</i>), Vol. 54, No. 12, 20 December 2014 (2014-12-20), ISSN: 1000-0054, pages 1544-1548	1-10
A	WO 2016/177963 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 10 November 2016 (2016-11-10) entire document	1-10
A	KR 20120069949 A (KOREA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION) 29 June 2012 (2012-06-29) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/124618

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	113119114	A	16 July 2021	None			
CN	110640736	A	03 January 2020	None			
CN	112091979	A	18 December 2020	None			
CN	109895097	A	18 June 2019	None			
CN	111629867	A	04 September 2020	US	2020376663	A1	03 December 2020
				EP	3723945	A1	21 October 2020
				DE	102017129665	B3	24 January 2019
				WO	2019115471	A1	20 June 2019
				JP	2021506031	W	18 February 2021
KR	20120069949	A	29 June 2012	KR	101234371	B1	18 February 2013

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/124618

A. 主题的分类

B25J 9/16(2006.01)i; B25J 18/00(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)

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))

WPI; EPDOC; CNPAT; CNKI; 机械臂, 机器人, 路径规划, 运动规划, 优化, 迭代, 梯度, 收敛, 关节角, 转角, 角度, 终止, 条件, 阈值, robot, arm, manipulator, path, mov+, plan+, track, updat+, grad+, convergence, optimiz+, joint, condition, terminat+, end+.

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
PX	CN 113119114 A (深圳市优必选科技股份有限公司) 2021年7月16日 (2021 - 07 - 16) 说明书第0063-0141段, 图1-5	1-10
X	CN 110640736 A (南京工业大学) 2020年1月3日 (2020 - 01 - 03) 说明书第0031-0048段, 图1-2	1、7-10
Y	CN 110640736 A (南京工业大学) 2020年1月3日 (2020 - 01 - 03) 说明书第0031段-0048段, 图1-2	2、4-6
Y	章婷等. "混合混沌法在机器人操作臂路径寻优中的应用" 机电产品开发与创新, 第20卷, 第04期, 2007年7月28日 (2007 - 07 - 28), ISSN: 1002-6673, 第14-15, 17页	2、4-6
A	CN 112091979 A (哈尔滨工业大学) 2020年12月18日 (2020 - 12 - 18) 全文	1-10
A	CN 109895097 A (宁波凯德科技服务有限公司) 2019年6月18日 (2019 - 06 - 18) 全文	1-10
A	CN 111629867 A (皮尔茨公司) 2020年9月4日 (2020 - 09 - 04) 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

2021年12月14日

国际检索报告邮寄日期

2022年1月18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

授权官员

张倩茹

电话号码 86-10-53960901

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	黄文炳等. “考虑冗余机械臂末端运动特性的规划方法” 清华大学学报(自然科学版), 第54卷, 第12期, 2014年12月20日 (2014 - 12 - 20), ISSN: 1000-0054, 第1544-1548页	1-10
A	WO 2016/177963 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 2016年11月10日 (2016 - 11 - 10) 全文	1-10
A	KR 20120069949 A (UNIV KOREA RES&BUSINESS FOUND) 2012年6月29日 (2012 - 06 - 29) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/124618

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	113119114	A	2021年7月16日	无			
CN	110640736	A	2020年1月3日	无			
CN	112091979	A	2020年12月18日	无			
CN	109895097	A	2019年6月18日	无			
CN	111629867	A	2020年9月4日	US	2020376663	A1	2020年12月3日
				EP	3723945	A1	2020年10月21日
				DE	102017129665	B3	2019年1月24日
				WO	2019115471	A1	2019年6月20日
				JP	2021506031	W	2021年2月18日
KR	20120069949	A	2012年6月29日	KR	101234371	B1	2013年2月18日