

(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 11 月 3 日 (03.11.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/227429 A1

(51) 国际专利分类号:
G05D 1/02 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/125403

(22) 国际申请日: 2021 年 10 月 21 日 (21.10.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110479959.8 2021年4月30日 (30.04.2021) 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: 白杰 (**BAI, Jie**); 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)。 葛利刚 (**GE, Ligang**); 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)。 王鸿舸 (**WANG, Hongge**); 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)。 陈春玉 (**CHEN, Chunyu**); 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)。 罗秋月 (**LUO, Qiuyue**); 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

(54) **Title:** GAIT TRAJECTORY PLANNING METHOD AND DEVICE, READABLE STORAGE MEDIUM, AND ROBOT

(54) 发明名称: 一种步态轨迹规划方法、装置、可读存储介质及机器人

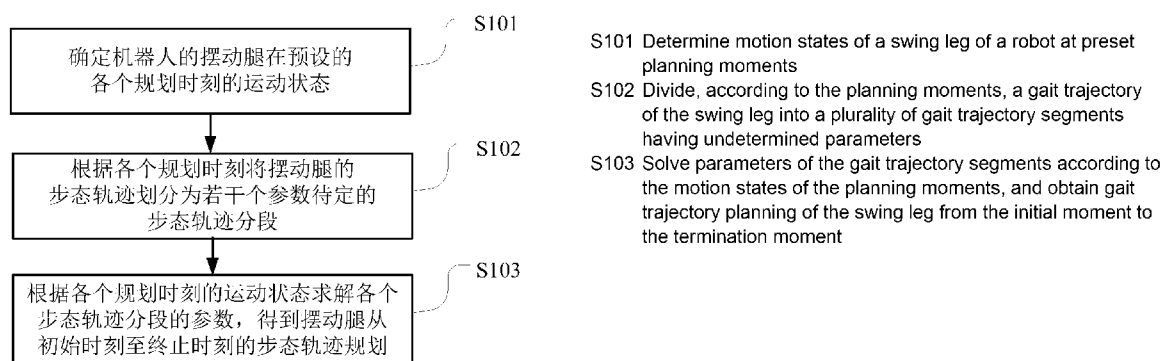


图 1

(57) **Abstract:** A gait trajectory planning method and device, a computer readable storage medium, and a robot. The method comprises: determining motion states of a swing leg of a robot at preset planning moments (S101), the planning moments comprising an initial moment, a termination moment, and a plurality of intermediate moments between the initial moment and the termination moment; dividing, according to the planning moments, a gait trajectory of the swing leg into a plurality of gait trajectory segments having undetermined parameters (S102); and solving parameters of the gait trajectory segments according to the motion states of the planning moments, and obtaining gait trajectory planning of the swing leg from the initial moment to the termination moment (S103). According to the method, the motion states of the swing leg of the robot at the initial moment, the termination moment, and the plurality of intermediate moments are comprehensively considered, and the gait trajectory is obtained by segmented planning, so that the stability of the robot is greatly improved.

(57) **摘要:** 一种步态轨迹规划方法、装置、计算机可读存储介质及机器人, 方法包括: 确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态 (S101), 规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于初始时刻与终止时刻之间的若干个中间时刻; 根据各个规划时刻将摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段 (S102); 根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数, 得到摆动腿从初始时刻至终止时刻的步态轨迹规划 (S103)。该方法综合考虑机器人的摆动腿在初始时刻、终止时刻以及若干个中间时刻的运动状态, 通过分段规划来得到步态轨迹, 极大提高了机器人的稳定性。

518000 (CN)。麻星星(MA, Xingxing); 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)。周江琛(ZHOU, Jiangchen); 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, 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))。

一种步态轨迹规划方法、装置、可读存储介质及机器人

本申请要求于 2021 年 04 月 30 日在中国专利局提交的、申请号为 202110479959.8 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，尤其涉及一种步态轨迹规划方法、装置、计算机可读存储介质及机器人。

背景技术

仿人机器人的拟人化双足不仅需要在地面稳定行走，还需要能够在上下台阶或斜坡，跨越障碍等复杂的环境中稳定行走。在现有的步态轨迹规划中，通常是针对初始点和终止点这两个点，采用多项式拟合的方式规划出一条从初始点到终止点的步态轨迹，这种方式虽然可以实现步态轨迹的规划，但稳定性往往较差。

技术问题

有鉴于此，本申请实施例提供了一种步态轨迹规划方法、装置、计算机可读存储介质及机器人，以解决现有的步态轨迹规划方法稳定性较差的问题。

技术方案

本申请实施例的第一方面提供了一种步态轨迹规划方法，可以包括：

确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态，所述规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的若干个中间时刻；

根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段；

20 根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数，得到所述摆动腿从所述初始时刻至所述终止时刻的步态轨迹规划。

在第一方面的一种具体实现中，所述根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段，可以包括：

25 根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为如下式所示的若干个参数待定的步态轨迹分段：

$$x(t) = x_0, t \leq t_0$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, t_0 < t \leq t_1$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + b_1(t - t_1)^3, t_1 < t \leq t_2$$

.....

30 $x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i(t - t_i)^3, t_{n-1} < t \leq t_n$

$$x(t) = x_n, t > t_n$$

其中， t_0 为所述初始时刻， t_n 为所述终止时刻， t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_{n-1} 为处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的各个中间时刻， a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 $\dots$ 、 b_{n-1} 为待定的参数， $x(t)$ 为所述摆动腿的步态轨迹。

35 在第一方面的一种具体实现中，所述根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数，可以包括：

根据各个规划时刻构建第一矩阵；

根据各个待定的参数构建第二矩阵；

根据各个规划时刻的运动状态构建第三矩阵；

40 根据所述第一矩阵、所述第二矩阵和所述第三矩阵构建对各个待定的参数进行求解的方程组；

根据所述方程组求解各个步态轨迹分段的参数。

在第一方面的一种具体实现中,所述根据所述第一矩阵、所述第二矩阵和所述第三矩阵构建对各个待定的参数进行求解的方程组,可以包括:

构建如下式所示的方程组:

$$AX = B$$

其中,A为所述第一矩阵,X为所述第二矩阵,B为所述第三矩阵。

5 在第一方面的一种具体实现中,所述各个规划时刻的运动状态可以包括:所述初始时刻的位置和速度、所述终止时刻的位置和速度以及各个中间时刻的位置;

所述根据各个规划时刻构建第一矩阵,可以包括:

构建如下式所示的第一矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \\ 0 & 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_n - t_1)^3/6 & (t_n - t_2)^3/6 & \dots & (t_n - t_{n-1})^3/6 \\ (t_n - t_1)^2/3 & (t_n - t_2)^2/3 & \dots & (t_n - t_{n-1})^2/3 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 & t_{n-1}^3 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_2 - t_1)^3/6 & 0 & \dots & 0 \\ (t_3 - t_1)^3/6 & (t_3 - t_2)^3/6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ (t_{n-1} - t_1)^3/6 & (t_{n-1} - t_2)^3/6 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

其中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为所述第一矩阵的子矩阵;

10 所述根据各个待定的参数构建第二矩阵,可以包括:

构建如下式所示的第二矩阵:

$$X = [a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]^T$$

其中,X为所述第二矩阵;

所述根据各个规划时刻的运动状态构建第三矩阵,可以包括:

构建如下式所示的第三矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ x_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{bmatrix}$$

15 其中, B_1 、 B_2 为所述第三矩阵的子矩阵, x_0 为所述初始时刻的位置, v_0 为所述初始时

刻的速度, x_n 为所述终止时刻的位置, v_n 为所述终止时刻的速度, x_1 、 x_2 、 $\cdots$ 、 x_{n-1} 为各个中间时刻的位置。

在第一方面的一种具体实现中, 所述确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态, 可以包括:

5 根据所述摆动腿在所述初始时刻的运动状态确定所述摆动腿在第一个中间时刻的运动状态。

在第一方面的一种具体实现中, 所述确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态, 可以包括:

10 根据所述摆动腿在所述终止时刻的运动状态确定所述摆动腿在最后一个中间时刻的运动状态。

本申请实施例的第二方面提供了一种步态轨迹规划装置, 可以包括:

运动状态确定模块, 用于确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态, 所述规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的若干个中间时刻;

15 步态轨迹分段模块, 用于根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段;

参数求解模块, 用于根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数, 得到所述摆动腿从所述初始时刻至所述终止时刻的步态轨迹规划。

20 在第二方面的一种具体实现中, 所述步态轨迹分段模块具体用于根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为如下式所示的若干个参数待定的步态轨迹分段:

$$x(t) = x_0, t \leq t_0$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, t_0 < t \leq t_1$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + b_1(t - t_1)^3, t_1 < t \leq t_2$$

.....

$$25 \quad x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i(t - t_i)^3, t_{n-1} < t \leq t_n$$

$$x(t) = x_n, t > t_n$$

其中, t_0 为所述初始时刻, t_n 为所述终止时刻, t_1 、 t_2 、 $\cdots$ 、 t_{n-1} 为处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的各个中间时刻, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 $\cdots$ 、 b_{n-1} 为待定的参数, $x(t)$ 为所述摆动腿的步态轨迹。

30 在第二方面的一种具体实现中, 所述参数求解模块可以包括:

第一矩阵构建单元, 用于根据各个规划时刻构建第一矩阵;

第二矩阵构建单元, 用于根据各个待定的参数构建第二矩阵;

第三矩阵构建单元, 用于根据各个规划时刻的运动状态构建第三矩阵;

35 方程组构建单元, 用于根据所述第一矩阵、所述第二矩阵和所述第三矩阵构建对各个待定的参数进行求解的方程组;

参数求解单元, 用于根据所述方程组求解各个步态轨迹分段的参数。

在第二方面的一种具体实现中, 所述方程组构建单元具体用于构建如下式所示的方程组:

$$AX = B$$

其中, A 为所述第一矩阵, X 为所述第二矩阵, B 为所述第三矩阵。

40 在第二方面的一种具体实现中, 所述各个规划时刻的运动状态包括: 所述初始时刻的位置和速度、所述终止时刻的位置和速度以及各个中间时刻的位置;

所述第一矩阵构建单元具体用于构建如下式所示的第一矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \\ 0 & 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_n - t_1)^3/6 & (t_n - t_2)^3/6 & \dots & (t_n - t_{n-1})^3/6 \\ (t_n - t_1)^2/3 & (t_n - t_2)^2/3 & \dots & (t_n - t_{n-1})^2/3 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 & t_{n-1}^3 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_2 - t_1)^3/6 & 0 & \dots & 0 \\ (t_3 - t_1)^3/6 & (t_3 - t_2)^3/6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ (t_{n-1} - t_1)^3/6 & (t_{n-1} - t_2)^3/6 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

其中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为所述第一矩阵的子矩阵;

所述第二矩阵构建单元具体用于构建如下式所示的第二矩阵:

$$X = [a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]^T$$

所述第三矩阵构建单元具体用于构建如下式所示的第三矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ x_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{bmatrix}$$

其中, B_1 、 B_2 为所述第三矩阵的子矩阵, x_0 为所述初始时刻的位置, v_0 为所述初始时刻的速度, x_n 为所述终止时刻的位置, v_n 为所述终止时刻的速度, x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_{n-1} 为各个中间时刻的位置。

在第二方面的一种具体实现中, 所述运动状态确定模块可以包括:

后摆规划处理单元, 用于根据所述摆动腿在所述初始时刻的运动状态确定所述摆动腿在第一个中间时刻的运动状态。

在第二方面的一种具体实现中, 所述运动状态确定模块可以包括:

前摆规划处理单元, 用于根据所述摆动腿在所述终止时刻的运动状态确定所述摆动腿在最后一个中间时刻的运动状态。

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步态轨迹规划方法的步骤。

本申请实施例的第四方面提供了一种机器人, 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步态轨迹规划方法的步骤。

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器人上运行时，使得机器人执行上述任一种步态轨迹规划方法的步骤。

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：本申请实施例确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态，所述规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的若干个中间时刻；根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段；根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数，得到所述摆动腿从所述初始时刻至所述终止时刻的步态轨迹规划。通过本申请实施例，综合考虑机器人的摆动腿在初始时刻、终止时刻以及若干个中间时刻的运动状态，将摆动腿的步态轨迹划分为若干个步态轨迹分段，并对各个步态轨迹分段的参数进行求解，得到完整的步态轨迹规划，极大提高了机器人的稳定性。

附图说明

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步态轨迹规划方法的一个实施例流程图；

图 2 为在步态轨迹规划中使用后摆规划和前摆规划的示意图；

图 3 为机器人快速行走的场景示意图；

图 4 为机器人上楼梯/斜坡或迈上障碍物的场景示意图；

图 5 为机器人下楼梯/斜坡或迈下障碍物的场景示意图；

图 6 为本申请实施例中一种步态轨迹规划装置的一个实施例结构图；

图 7 为本申请实施例中一种机器人的示意框图。

本发明的实施方式

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。

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。

对于机器人的摆动腿而言，在进行一般的步态轨迹规划时，可以针对初始点和终止点

这两个点，采用多项式拟合的方式规划出一条从初始点到终止点的步态轨迹。为了便于区分，此处将这种步态轨迹规划称为常规轨迹规划。若将初始时刻记为 t_0 ，将初始时刻的位置和速度分别记为 x_0 和 v_0 ，将终止时刻记为 t_n ，将终止时刻的位置和速度分别记为 x_n 和 v_n ，则可以规划出如下式所示的步态轨迹：

$$x(t) = g'(x_0, v_0, t_0, x_n, v_n, t_n, t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

5 其中， g' 为关于 $x_0, v_0, t_0, x_n, v_n, t_n, t$ 的函数， a_0, a_1, a_2, a_3 为待定的参数， $x(t)$ 即为摆动腿的步态轨迹。

构建如下式所示的对各个待定的参数进行求解的方程组：

$$\begin{aligned} CY &= D \\ Y &= [a_0, a_1, a_2, a_3]^T \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \\ 0 & 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ x_n \\ v_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

10 通过求解该方程组，即可确定其中各个待定的参数，从而得到摆动腿从初始时刻至终止时刻的步态轨迹规划。在本申请实施例中，可以根据实际情况采用现有技术中的任意一种方程组求解方法，包括但不限于 SVD 分解、QR 分解等求解方法。

在本申请实施例的一种具体实现中，除了考虑初始点和终止点之后，还可以将两者之间的若干个中间点也加以考虑分析，从而提高机器人的稳定性。为了便于区分，此处将这种步态轨迹规划称为改进轨迹规划。请参阅图 1，本申请实施例中一种步态轨迹规划方法的一个实施例可以包括：

15 步骤 S101、确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态。

其中，规划时刻可以包括初始时刻、终止时刻以及处于初始时刻与终止时刻之间的若干个中间时刻。此处将各个规划时刻按照时间先后顺序依次记为： $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ ，则其中处于初始时刻 t_0 与终止时刻 t_n 之间的 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$ 即为中间时刻。各个规划时刻的运动状态可以包括：初始时刻的位置和速度、终止时刻的位置和速度以及各个中间时刻的位置。

20 此处将各个中间时刻 $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$ 的位置依次记为： $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ ，这些中间时刻的位置可以根据机器人运动的实际情况进行设置。

步骤 S102、根据各个规划时刻将摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段。

此时，摆动腿的步态轨迹可表示为：

$$x(t) = g(x_0, v_0, t_0, x_n, v_n, t_n, x_1, t_1, x_2, t_2, \dots, x_{n-1}, t_{n-1}, t)$$

25 其中， g 为关于 $x_0, v_0, t_0, x_n, v_n, t_n, x_1, t_1, x_2, t_2, \dots, x_{n-1}, t_{n-1}, t$ 的函数。

根据各个规划时刻，可以将摆动腿的步态轨迹划分为如下式所示的步态轨迹分段：

$$x(t) = x_0, \quad t \leq t_0$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad t_0 < t \leq t_1$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + b_1(t - t_1)^3, \quad t_1 < t \leq t_2$$

30

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i(t - t_i)^3, \quad t_{n-1} < t \leq t_n$$

$$x(t) = x_n, t > t_n$$

其中, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 $\dots$ 、 b_{n-1} 为待定的参数。

通过以上的对步态轨迹的分段规划, 在整个轨迹规划过程中能够保持位置、速度和加速度的连续, 避免力矩抖动的影响, 提高机器人的稳定性。

- 5 步骤 S103、根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数, 得到摆动腿从初始时刻至终止时刻的步态轨迹规划。

具体地, 可以根据各个规划时刻构建如下式所示的第一矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \\ 0 & 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_n - t_1)^3/6 & (t_n - t_2)^3/6 & \dots & (t_n - t_{n-1})^3/6 \\ (t_n - t_1)^2/3 & (t_n - t_2)^2/3 & \dots & (t_n - t_{n-1})^2/3 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 & t_{n-1}^3 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_2 - t_1)^3/6 & 0 & \dots & 0 \\ (t_3 - t_1)^3/6 & (t_3 - t_2)^3/6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ (t_{n-1} - t_1)^3/6 & (t_{n-1} - t_2)^3/6 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

其中, A 为第一矩阵, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为第一矩阵的子矩阵, A_1 为4行4列的矩阵, A_2 为4行 $n-1$ 列的矩阵, A_3 为 $n-1$ 行4列的矩阵, A_4 为 $n-1$ 行 $n-1$ 列的对角元素为0的下三角矩阵。

- 10 根据各个待定的参数构建如下式所示的第二矩阵:

$$X = [a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]^T$$

其中, X 为第二矩阵。

根据各个规划时刻的运动状态构建如下式所示的第三矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ x_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{bmatrix}$$

其中, B 为第三矩阵, B_1 、 B_2 为第三矩阵的子矩阵。

- 15 根据第一矩阵、第二矩阵和第三矩阵构建如下式所示的对各个待定的参数进行求解的方程组:

$$AX = B$$

通过求解该方程组,即可确定其中各个待定的参数,从而得到摆动腿从初始时刻至终止时刻的步态轨迹规划。在本申请实施例中,可以根据实际情况采用现有技术中的任意一种方程组求解方法,包括但不限于 SVD 分解、QR 分解等求解方法。

通过本申请实施例,综合考虑机器人的摆动腿在初始时刻、终止时刻以及若干个中间时刻的运动状态,将摆动腿的步态轨迹划分为若干个步态轨迹分段,并对各个步态轨迹分段的参数进行求解,得到完整的步态轨迹规划,极大提高了机器人的稳定性。

在本申请实施例的一种具体实现中,可以根据摆动腿在初始时刻的运动状态确定摆动腿在第一个中间时刻的运动状态,即令: $x_1 = x_0$, 则在 $t_0 < t \leq t_1$ 的这一时间段内,开始时的位置与结束时的位置一致,而机器人若要向前运动,在 $t > t_1$ 时则有正向的速度和加速度,那么在 $t_0 < t \leq t_1$ 的这一时间段内满足 $x(t) < x_0$, 本申请实施例将这一时间段的步态轨迹规划称之为后摆规划。通过后摆规划,可以有效减小机器人前向与楼梯或障碍物碰撞的风险。

在本申请实施例的一种具体实现中,可以根据摆动腿在终止时刻的运动状态确定摆动腿在最后一个中间时刻的运动状态,即令: $x_{n-1} = x_n$, 则在 $t_{n-1} < t \leq t_n$ 的这一时间段内,开始时的位置与结束时的位置一致,而机器人若要向前运动,在 $t < t_{n-1}$ 时则有正向的速度和加速度,那么在 $t_0 < t \leq t_1$ 的这一时间段内满足 $x(t) > x_n$, 本申请实施例将这一时间段的步态轨迹规划称之为前摆规划。通过前摆规划,可以有效减小机器人后向与楼梯或障碍物碰撞的风险。

图 2 所示即为同时在步态轨迹规划中使用后摆规划和前摆规划的示意图。如图所示,整个步态轨迹按照时间划分为 I、II 和 III 三个区域,其中,区域 I 为 $t_0 < t \leq t_1$, 该区域中使用后摆规划;区域 II 为 $t_1 < t \leq t_{n-1}$, 该区域中为正常的改进轨迹规划。区域 III 为 $t_{n-1} < t \leq t_n$, 该区域中使用前摆规划。

需要注意的是,以上内容中,均是以机器人在前进方向(即 x 方向)上的步态轨迹规划为例进行说明,机器人在纵向(即 z 方向)上的步态轨迹规划与之类似,可参照 x 方向进行处理,此处不再赘述。

在具体应用中,可以根据实际的应用场景对常规轨迹规划、改进轨迹规划、前摆规划及后摆规划灵活地进行使用。

图 3 所示为机器人快速行走的场景,对于该场景,可以在改进轨迹规划的基础上进一步采用前摆规划和后摆规划来减小支撑腿摩擦力,以及减小机器人转向滑移,从而增加机器人的稳定性。

图 4 所示为机器人上楼梯/斜坡或迈上障碍物的场景,对于该场景,可以在改进轨迹规划的基础上进一步采用后摆规划来减小机器人前向与楼梯或障碍物碰撞的风险。

图 5 所示为机器人下楼梯/斜坡或迈下障碍物的场景,对于该场景,可以在改进轨迹规划的基础上进一步采用前摆规划来减小机器人后向与楼梯或障碍物碰撞的风险。

容易理解地,以上各场景均为示例,对于其它场景,可以根据实际情况灵活地进行步态轨迹规划,本申请实施例不再赘述。

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步态轨迹规划方法,图 6 示出了本申请实施例提供的一种步态轨迹规划装置的一个实施例结构图。

本实施例中,一种步态轨迹规划装置可以包括:

运动状态确定模块 601,用于确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态,所述规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的若干个中间时刻;

步态轨迹分段模块 602,用于根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段;

参数求解模块 603, 用于根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数, 得到所述摆动腿从所述初始时刻至所述终止时刻的步态轨迹规划。

在本申请实施例的一种具体实现中, 所述步态轨迹分段模块具体用于根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为如下式所示的若干个参数待定的步态轨迹分段:

$$\begin{aligned}
 &5 \quad x(t) = x_0, \quad t \leq t_0 \\
 &\quad x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad t_0 < t \leq t_1 \\
 &\quad x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + b_1(t - t_1)^3, \quad t_1 < t \leq t_2 \\
 &\quad \dots\dots \\
 &\quad x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i(t - t_i)^3, \quad t_{n-1} < t \leq t_n \\
 &10 \quad x(t) = x_n, \quad t > t_n
 \end{aligned}$$

其中, t_0 为所述初始时刻, t_n 为所述终止时刻, t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_{n-1} 为处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的各个中间时刻, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 $\dots$ 、 b_{n-1} 为待定的参数, $x(t)$ 为所述摆动腿的步态轨迹。

在本申请实施例的一种具体实现中, 所述参数求解模块可以包括:

- 15 第一矩阵构建单元, 用于根据各个规划时刻构建第一矩阵;
- 第二矩阵构建单元, 用于根据各个待定的参数构建第二矩阵;
- 第三矩阵构建单元, 用于根据各个规划时刻的运动状态构建第三矩阵;
- 方程组构建单元, 用于根据所述第一矩阵、所述第二矩阵和所述第三矩阵构建对各个待定的参数进行求解的方程组;
- 20 参数求解单元, 用于根据所述方程组求解各个步态轨迹分段的参数。

在本申请实施例的一种具体实现中, 所述方程组构建单元具体用于构建如下式所示的方程组:

$$AX = B$$

其中, A 为所述第一矩阵, X 为所述第二矩阵, B 为所述第三矩阵。

- 25 在本申请实施例的一种具体实现中, 所述各个规划时刻的运动状态包括: 所述初始时刻的位置和速度、所述终止时刻的位置和速度以及各个中间时刻的位置;

所述第一矩阵构建单元具体用于构建如下式所示的第一矩阵:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} \\
 A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \\ 0 & 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_n - t_1)^3/6 & (t_n - t_2)^3/6 & \dots & (t_n - t_{n-1})^3/6 \\ (t_n - t_1)^2/3 & (t_n - t_2)^2/3 & \dots & (t_n - t_{n-1})^2/3 \end{bmatrix} \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 & t_{n-1}^3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_2 - t_1)^3/6 & 0 & \dots & 0 \\ (t_3 - t_1)^3/6 & (t_3 - t_2)^3/6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ (t_{n-1} - t_1)^3/6 & (t_{n-1} - t_2)^3/6 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

其中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为所述第一矩阵的子矩阵;

所述第二矩阵构建单元具体用于构建如下式所示的第二矩阵:

$$X = [a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]^T$$

所述第三矩阵构建单元具体用于构建如下式所示的第三矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ x_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{bmatrix}$$

其中, B_1 、 B_2 为所述第三矩阵的子矩阵, x_0 为所述初始时刻的位置, v_0 为所述初始时刻的速度, x_n 为所述终止时刻的位置, v_n 为所述终止时刻的速度, x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_{n-1} 为各个中间时刻的位置。

在本申请实施例的一种具体实现中, 所述运动状态确定模块可以包括:

后摆规划处理单元, 用于根据所述摆动腿在所述初始时刻的运动状态确定所述摆动腿在第一个中间时刻的运动状态。

在本申请实施例的一种具体实现中, 所述运动状态确定模块可以包括:

前摆规划处理单元, 用于根据所述摆动腿在所述终止时刻的运动状态确定所述摆动腿在最后一个中间时刻的运动状态。

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。

图 7 示出了本申请实施例提供的一种机器人的示意框图, 为了便于说明, 仅示出了与本申请实施例相关的部分。

如图 7 所示, 该实施例的机器人 7 包括: 处理器 70、存储器 71 以及存储在所述存储器 71 中并可在所述处理器 70 上运行的计算机程序 72。所述处理器 70 执行所述计算机程序 72 时实现上述各个步态轨迹规划方法实施例中的步骤, 例如图 1 所示的步骤 S101 至步骤 S103。或者, 所述处理器 70 执行所述计算机程序 72 时实现上述各装置实施例中各模块/单元的功能, 例如图 6 所示模块 601 至模块 603 的功能。

示例性的, 所述计算机程序 72 可以被分割成一个或多个模块/单元, 所述一个或者多个模块/单元被存储在所述存储器 71 中, 并由所述处理器 70 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 72 在所述机器人 7 中的执行过程。

本领域技术人员可以理解, 图 7 仅仅是机器人 7 的示例, 并不构成对机器人 7 的限定, 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, 例如所述机器人 7 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 70 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 (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 71 可以是所述机器人 7 的内部存储单元, 例如机器人 7 的硬盘或内存。所述存储器 71 也可以是所述机器人 7 的外部存储设备, 例如所述机器人 7 上配备的插接式硬盘, 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 71 还可以既包括所述机器人 7 的内部存储单元也包括外部存储设备。所述存储器 71 用于存储所述计算机程序以及所述机器人 7 所需的其它程序和数据。所述存储器 71 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, 某个实施例中未详述或记载的部分, 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/机器人和方法, 可以通过其它的方式实现。例如, 以上所描述的装置/机器人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是通过一些接口, 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

5 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。

10 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. 一种步态轨迹规划方法，其特征在于，包括：

确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态，所述规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的若干个中间时刻；

根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段；

根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数，得到所述摆动腿从所述初始时刻至所述终止时刻的步态轨迹规划。

2. 根据权利要求1所述的步态轨迹规划方法，其特征在于，所述根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段，包括：

根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为如下式所示的若干个参数待定的步态轨迹分段：

$$x(t) = x_0, \quad t \leq t_0$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad t_0 < t \leq t_1$$

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + b_1(t - t_1)^3, \quad t_1 < t \leq t_2$$

.....

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i(t - t_i)^3, \quad t_{n-1} < t \leq t_n$$

$$x(t) = x_n, \quad t > t_n$$

其中， t_0 为所述初始时刻， t_n 为所述终止时刻， t_1 、 t_2 、 $\dots$ 、 t_{n-1} 为处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的各个中间时刻， a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 $\dots$ 、 b_{n-1} 为待定的参数， $x(t)$ 为所述摆动腿的步态轨迹。

3. 根据权利要求2所述的步态轨迹规划方法，其特征在于，所述根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数，包括：

根据各个规划时刻构建第一矩阵；

根据各个待定的参数构建第二矩阵；

根据各个规划时刻的运动状态构建第三矩阵；

根据所述第一矩阵、所述第二矩阵和所述第三矩阵构建对各个待定的参数进行求解的方程组；

根据所述方程组求解各个步态轨迹分段的参数。

4. 根据权利要求3所述的步态轨迹规划方法，其特征在于，所述根据所述第一矩阵、所述第二矩阵和所述第三矩阵构建对各个待定的参数进行求解的方程组，包括：

构建如下式所示的方程组：

$$AX = B$$

其中， A 为所述第一矩阵， X 为所述第二矩阵， B 为所述第三矩阵。

5. 根据权利要求3所述的步态轨迹规划方法，其特征在于，所述各个规划时刻的运动状态包括：所述初始时刻的位置和速度、所述终止时刻的位置和速度以及各个中间时刻的位置；

所述根据各个规划时刻构建第一矩阵，包括：

构建如下式所示的第一矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \\ 0 & 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_n - t_1)^3/6 & (t_n - t_2)^3/6 & \dots & (t_n - t_{n-1})^3/6 \\ (t_n - t_1)^2/3 & (t_n - t_2)^2/3 & \dots & (t_n - t_{n-1})^2/3 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_{n-1} & t_{n-1}^2 & t_{n-1}^3 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ (t_2 - t_1)^3/6 & 0 & \dots & 0 \\ (t_3 - t_1)^3/6 & (t_3 - t_2)^3/6 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ (t_{n-1} - t_1)^3/6 & (t_{n-1} - t_2)^3/6 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

其中，A为所述第一矩阵， A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为所述第一矩阵的子矩阵；
 所述根据各个待定的参数构建第二矩阵，包括：
 构建如下式所示的第二矩阵：

$$X = [a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}]^T$$

其中，X为所述第二矩阵；

- 5 所述根据各个规划时刻的运动状态构建第三矩阵，包括：
 构建如下式所示的第三矩阵：

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_0 \\ v_0 \\ x_n \\ v_n \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \end{bmatrix}$$

其中，B为所述第三矩阵， B_1 、 B_2 为所述第三矩阵的子矩阵， x_0 为所述初始时刻的位置， v_0 为所述初始时刻的速度， x_n 为所述终止时刻的位置， v_n 为所述终止时刻的速度， x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_{n-1} 为各个中间时刻的位置。

- 10 6. 根据权利要求1至5中任一项所述的步态轨迹规划方法，其特征在于，所述确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态，包括：

根据所述摆动腿在所述初始时刻的运动状态确定所述摆动腿在第一个中间时刻的运动状态。

- 15 7. 根据权利要求1至5中任一项所述的步态轨迹规划方法，其特征在于，所述确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态，包括：

根据所述摆动腿在所述终止时刻的运动状态确定所述摆动腿在最后一个中间时刻的运动状态。

8. 一种步态轨迹规划装置，其特征在于，包括：

- 20 运动状态确定模块，用于确定机器人的摆动腿在预设的各个规划时刻的运动状态，所述规划时刻包括初始时刻、终止时刻以及处于所述初始时刻与所述终止时刻之间的若干个中间时刻；

步态轨迹分段模块，用于根据各个规划时刻将所述摆动腿的步态轨迹划分为若干个参数待定的步态轨迹分段；

参数求解模块，用于根据各个规划时刻的运动状态求解各个步态轨迹分段的参数，得到所述摆动腿从所述初始时刻至所述终止时刻的步态轨迹规划。

5 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 中任一项所述的步态轨迹规划方法的步骤。

10. 一种机器人，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 中任一项所述的步态轨迹规划方法的步骤。

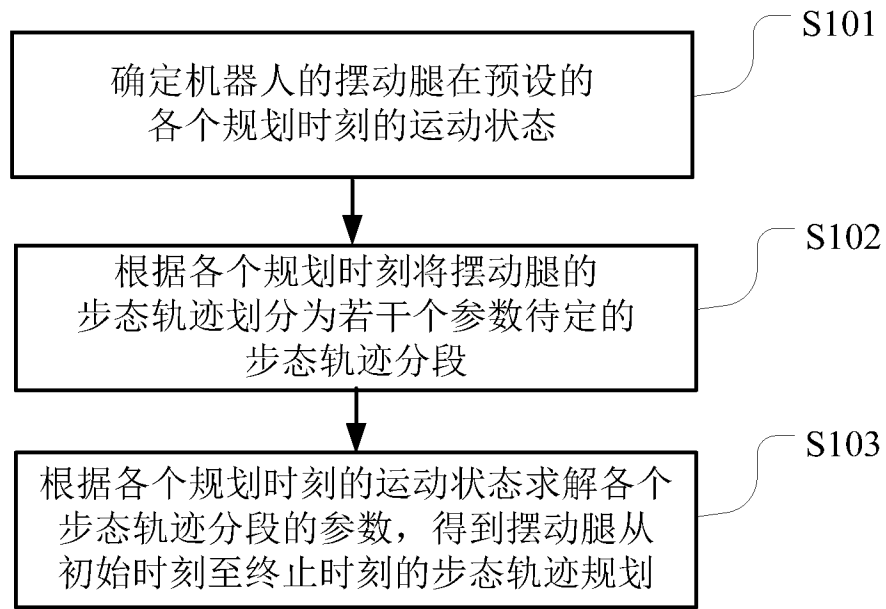


图 1

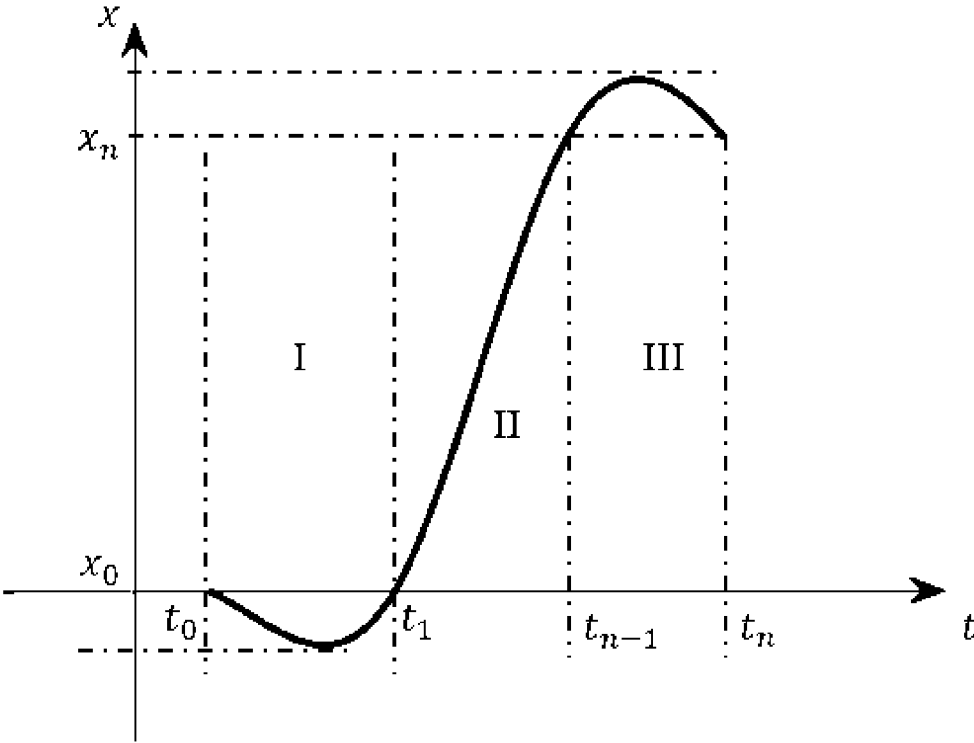


图 2

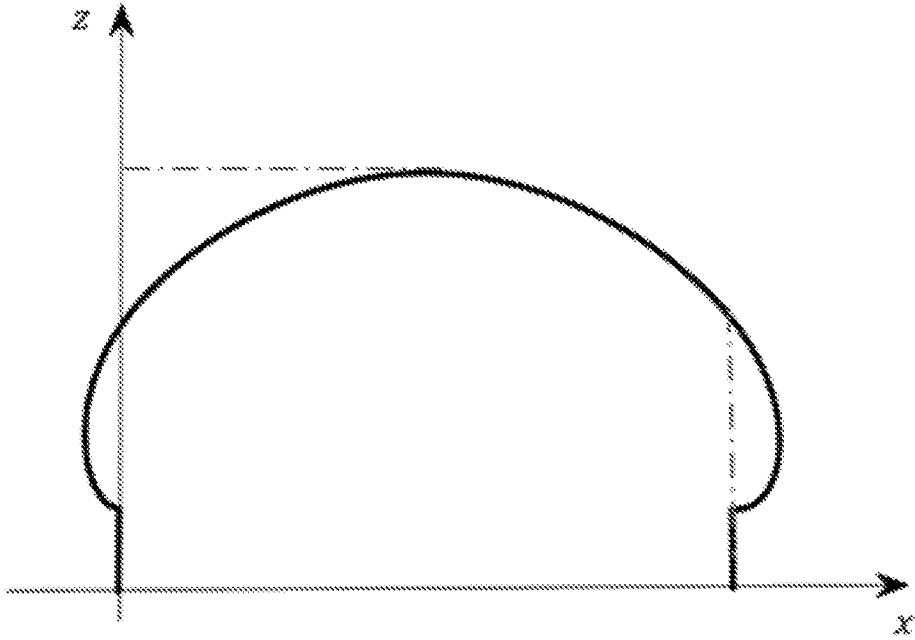


图 3

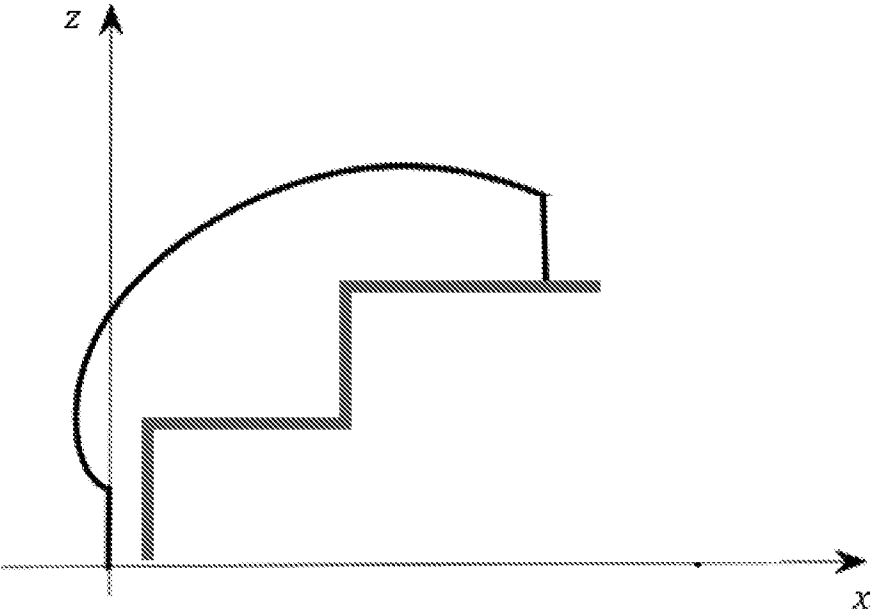


图 4

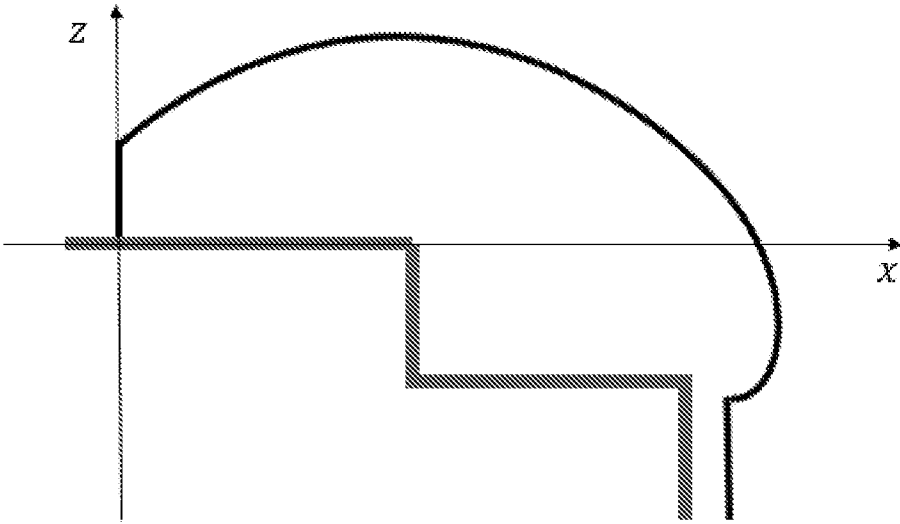


图 5

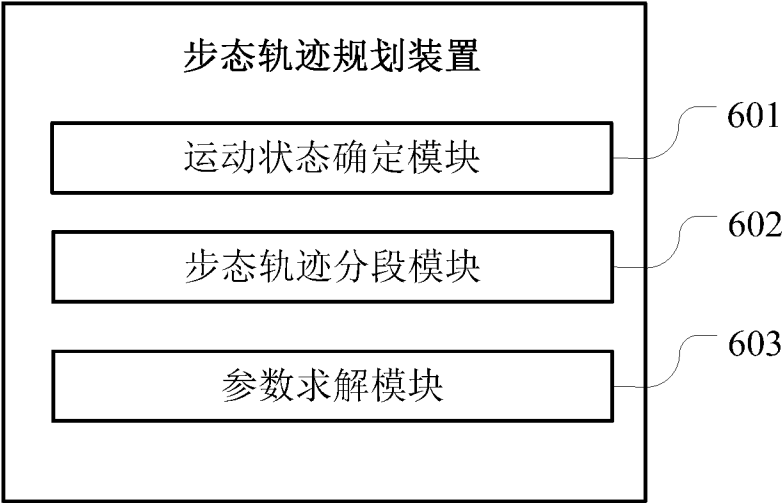


图 6

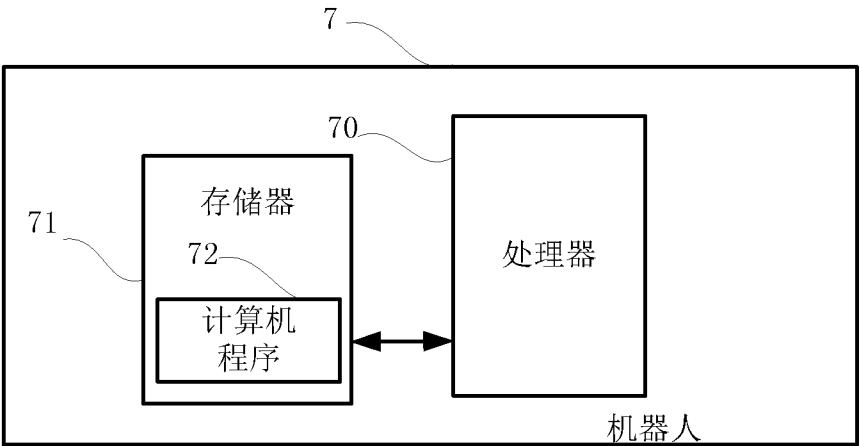


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/125403

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; B25J; B62D

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; CNABS; CNKI; VEN: 机器人, 步态, 轨迹, 规划, 结束, 初始, 起始, 分段, 阶段, 终止, 稳定, 双足, 双腿, 行走, robot, gait, walk+, trajectory, track, plan+, intermediate, initial, end, finish, segment, phase, stage, stabl+, foot, feet, leg

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 113110484 A (UBTECH ROBOTICS CORP.) 13 July 2021 (2021-07-13) claims 1-10	1-10
A	CN 110400618 A (BEIHANG UNIVERSITY) 01 November 2019 (2019-11-01) description, paragraphs 0063-0125, and figures 1-6	1-10
A	CN 109202901 A (XIAMEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 15 January 2019 (2019-01-15) entire document	1-10
A	CN 111664851 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 15 September 2020 (2020-09-15) entire document	1-10
A	CN 110315543 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 11 October 2019 (2019-10-11) entire document	1-10
A	WO 2020233050 A1 (UNIV ZHEJIANG) 26 November 2020 (2020-11-26) entire document	1-10
A	US 10179619 B1 (SCHAFT INC.) 15 January 2019 (2019-01-15) 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

28 January 2022

Date of mailing of the international search report

09 February 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
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/125403

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	113110484	A	13 July 2021	None			
CN	110400618	A	01 November 2019	None			
CN	109202901	A	15 January 2019	None			
CN	111664851	A	15 September 2020	None			
CN	110315543	A	11 October 2019	WO	2021017356	A1	04 February 2021
WO	2020233050	A1	26 November 2020	US	2021237265	A1	05 August 2021
US	10179619	B1	15 January 2019	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/125403

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; B25J; B62D

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))

CNTXT; CNABS; CNKI; VEN: 机器人, 步态, 轨迹, 规划, 结束, 初始, 起始, 分段, 阶段, 终止, 稳定, 双足, 双腿, 行走, robot, gait, walk+, trajectory, track, plan+, intermediate, initial, end, finish, segment, phase, stage, stabl+, foot, feet, leg

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 113110484 A (深圳市优必选科技股份有限公司) 2021年7月13日 (2021 - 07 - 13) 权利要求1-10	1-10
A	CN 110400618 A (北京航空航天大学) 2019年11月1日 (2019 - 11 - 01) 说明书第0063-0125段、附图1-6	1-10
A	CN 109202901 A (厦门理工学院) 2019年1月15日 (2019 - 01 - 15) 全文	1-10
A	CN 111664851 A (哈尔滨工业大学) 2020年9月15日 (2020 - 09 - 15) 全文	1-10
A	CN 110315543 A (北京理工大学) 2019年10月11日 (2019 - 10 - 11) 全文	1-10
A	WO 2020233050 A1 (UNIV ZHEJIANG) 2020年11月26日 (2020 - 11 - 26) 全文	1-10
A	US 10179619 B1 (SCHAFT INC) 2019年1月15日 (2019 - 01 - 15) 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

2022年1月28日

国际检索报告邮寄日期

2022年2月9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

孙培安

电话号码 86-(010)-62085800

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/125403

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	113110484	A	2021年7月13日	无			
CN	110400618	A	2019年11月1日	无			
CN	109202901	A	2019年1月15日	无			
CN	111664851	A	2020年9月15日	无			
CN	110315543	A	2019年10月11日	WO	2021017356	A1	2021年2月4日
WO	2020233050	A1	2020年11月26日	US	2021237265	A1	2021年8月5日
US	10179619	B1	2019年1月15日	无			