

四足步行机的全方位行走探讨

孙汉旭 张启先 于东英

(北京航空航天大学机原教研室)

摘要: 本文对缩放式四足步行机器人 (简称步行机) 的全方位行走问题进行了探讨。给出了一种拟定全方位行走的方法, 同时, 给出了用该方法拟定出步态的可行性条件和垂直方向稳定性条件。举例模拟了步行机按拟定出的全方位步态的行走。

一、引 言

步行机是机器人领域的一个重要分支。四足步行机比两足步行机承载能力大和比六足、八足步行机的腿数目少等优点受到了许多国家的广泛重视。步行机在机体的姿态不变的情况下向任意方向行走的能力称为全方位行走能力。对六足、八足等多足步行机全方位行走容易实现, 而四足步行机以爬行步态向某一方向行走, 首先, 需要给定各足相对于机体重心的初始位置。要使步行机沿不同方向行走就得先使各足踏在相应方向的初始位置上。我们把能实现从一个方向的初始位置向另一方向的初始位置过渡的步态称为全方位步态。本文结合我校正在研制的四足步行机来讨论四足步行机的全方位行走问题。

二、全方位步态的拟定

在步态拟定中, 我们只考虑各足的水平两坐标的变化, 沿垂坐标被用来适应地面凹凸不平。故我们把步行机的重心和各足的踏地点都投影到一个水平面 V 上来研究。由于机体的重量远大于各条腿的重量, 我们把机体重心视为步行机重心。如图1所示, O 点为机体重心在 V 面上的投影, I、II、III、IV四个矩形域为足(I)、足(II)、足(III)、和(IV)足相对于机体运动空间在 V 平面上的投影, x 和 y 两坐标轴为机体自两根对称轴在 V 平面上的投影, l_1 和 l_2 为各足分别沿 x 和 y 两坐标轴方向的最大跨距; H 和 W 为各足运动区域的内边距两坐标轴的距离。对四足步行机前进和后退的初始姿态只差半个规则步态^[1] (规则步态是一种最易实现的爬行步态如文献中所述) 周期, 把前进时足(III)作为后退时足(I), 其余各足序号逆时针排编即可。故这里只探讨前进时的情况。向左和向右的步态初始姿态也只相差半个规则步态周期,

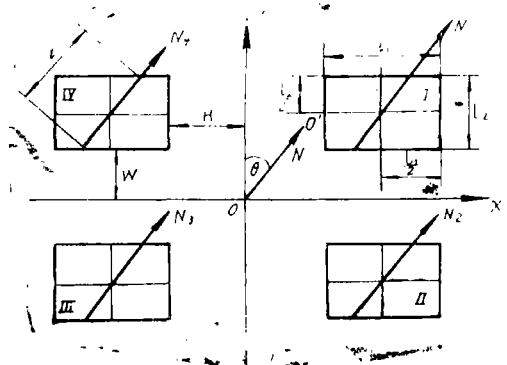


图1

故只探讨向右前方以 x 坐标轴起逆时针 $0 \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 的任一方向的行走问题。

我们把步行机各足都完成一次抬起跨越并落地使步行机回复到给定的初始姿态上去的过程称为一个步态周期。设经过一个全方位步态机体重心移动到 $0'$ 点, 见图 1, $0'$ 点在 $0xy$ 坐标系中的坐标为 (x_0, y_0) 。则步行机新的运动方向 N 与原运动方向 y 坐标轴的夹角 θ 为:

$$\theta = -\arctg(x_0/y_0) \quad (1)$$

则各足端迹线 $N_i (i = I, II, III, IV)$ 与机体坐标系 $0xy$ 的 y 坐标轴的夹角也为 θ 。各足在其足端迹线 N_i 方向上的最大跨距为 l_i 。为了使 $l \geq l_i (i = 1, 2)$ 。我们让各足的足端迹线通过各足运动区域的中点, 如图 1 所示。

(一) 有关量的定义与各足的抬跨顺序

定义 1: 前进方向的稳定裕量 S_+ 为在一个步态周期中步行机前进方向上重心到落地支撑各足的踏地点组成多边形边的最短的长度。

定义 2: 垂直方向的稳定裕量 S_{\perp} 为垂直于步行机前进方向上的稳定裕量。

定义 3: θ_0 为各足抬跨顺序的转换角。

$$\theta_0 = -\arctg(l_1/l_2) \quad (2)$$

定义 4: θ_0 为足(I)和足(III)两足运动范围中心点间的连线与 y 坐标轴的夹角, 称为避开角。

定义 5: P 为规则步态里, 一足抬起跨越而其余三足落地支撑过程中, 重心沿 N 方向移动的距离。

为了使步行机能沿我们给定的方向 N 顺利行走, 我们规定当 $\theta \geq \theta_0$ 时, 步行机按足(I) \rightarrow 足(III) \rightarrow 足(IV) \rightarrow 足(II) 的顺序抬跨各足; 当 $\theta \leq \theta_0$ 时, 按足(I) \rightarrow 足(III) \rightarrow 足(II) \rightarrow 足(IV) 的顺序抬跨各足。

(二) 全方位步态的拟定

在原行走方向 y 坐标轴和将要沿其行走的方向 N 已知的情况下来拟定两方向间过渡的全方位步态。下面对步行机按足(I) \rightarrow 足(III) \rightarrow 足(II) \rightarrow 足(IV) (第一种抬跨足顺序) 和按足(I) \rightarrow 足(III) \rightarrow 足(IV) \rightarrow 足(II) (第二种抬跨足顺序) 分别拟定步态。

1. 第一种抬跨顺序下步态拟定

见图 3, 在各足抬跨顺序确定后我们把全方位步态周期分为 6 个子过程, 用时刻 $t_0, t_1,$

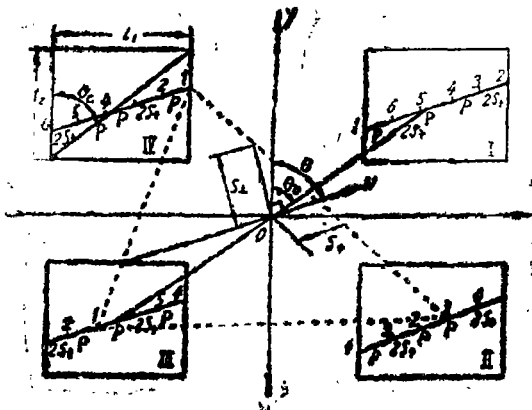


图 2

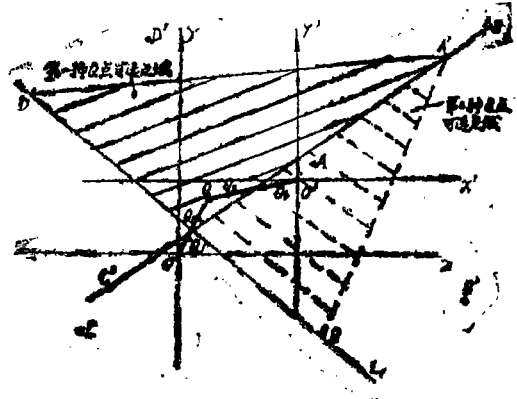


图 3

t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 等来给各子过程定界。在步态的整个过程中,我们拟定在 t_3 时刻足(Ⅲ)应该刚刚抬跨完毕着地且紧接着足(Ⅱ)抬起跨越。当按足(Ⅰ)→足(Ⅲ)→足(Ⅱ)→足(Ⅳ)的顺序抬跨时, t_3 时刻足(Ⅰ)和足(Ⅲ)已从原规则步态的初始着地点抬起落到了 N 方向上规则步态的初始着地点上,而足(Ⅱ)和足(Ⅳ)留在原地。见图3,设足(Ⅰ)、足(Ⅱ)、足(Ⅲ)和足(Ⅳ)的原初始着地点分别为 A, B, C, D 点,新着地点为 A', B', C', D' 点。新着地点就是步行机新行走方向 N 上规则步态各足的初始着地点。过足(Ⅱ)和足(Ⅳ)原初始着地点 B, D 作直线 L_1 ;过足(Ⅰ)足(Ⅲ)的新着地点 A', C' 、作直线 L_2 。要保证足(Ⅲ)在抬跨过程中步行机不跌倒,步行机重心应在 L_1 直线的上边 D, B, A' 点组成的三角形之内;另外,为了保证在足(Ⅲ)一落地足(Ⅱ)抬得起来,步行机重心又应在 L_2 直线上边 A', C', D 点组成的三角形内。故 t_3 时刻重心应到达的 Q 点应在 $\triangle DBA'$ 和 $\triangle A'C'D$ 的重合域内,见图3的阴影部分。在 Q 选定后,我们用 \overline{OQ} 和 $\overline{QO'}$ 两条直线来作为全方位步态步行机重心的运动轨迹。

在 \overline{OQ} 直线上在 L_1 直线下边且距 L_1 直线的距离为前进方向稳定裕 S_+ 的点为 Q_1 点;在 L_1 直线上边且距 L_1 直线也为 S_+ 的点为 Q_2 点。同理,在 $\overline{QO'}$ 直线上在 L_2 直线上边且距 L_2 直线的距离为 S_+ 的点为 Q_3 ;在 L_2 直线下边且距 L_2 直线距离为 S_+ 的点为 Q_4 点。步态过程为: $t_0 \rightarrow t_1$ 这个子过程中,机体以速度 v 匀速沿 \overline{OQ} 直线从 O 移动到 Q_1 点,同时足(Ⅰ)从 A 点抬起落到 A' 点; $t_1 \rightarrow t_2$ 这个子过程中,四个足均不抬起,而机体以匀速 v 沿 \overline{OQ} 越过 L_1 线至 Q_2 点。 $t_2 \rightarrow t_3$ 这个子过程中,机体匀速 v 沿 \overline{OQ} 移动到 Q 点,同时足(Ⅲ)从 C 点抬起落到 C' 点; $t_3 \rightarrow t_4$ 子过程中,机体以匀速 v 沿 $\overline{QO'}$ 直线从 Q 点移动到 Q_3 点,同时足(Ⅱ)从 B 点抬起落到 B' 点; $t_4 \rightarrow t_5$ 子过程中,机体匀速 v 沿 $\overline{QO'}$ 直线移动到 Q_4 ,四个足均不抬起,使重心安全过 L_2 直线; $t_5 \rightarrow t_6$ 子过程中,机体以匀速沿 $\overline{QO'}$ 直线从 Q_4 移动到 O' 点,同时足(Ⅳ)从 D 点抬起落到 D' 点。至此一个稳定的步态周期完成。

2. 第二种抬跨顺序下步态的拟定

第二种抬跨足顺序和第一种抬跨足顺序仅是把第一种足(Ⅱ)→足(Ⅳ)变化为足(Ⅳ)→足(Ⅱ),而前面的足(Ⅰ)→足(Ⅲ)的顺序没变。故在拟定步态过程中, Q 点应在 L_1 直线上边的 $\triangle DBA'$ 和 L_2 直线下边的 $\triangle A'C'B$ 重合域内选取见图3。 $Q_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的求解和步态的过程与(1)段相似,故在此从略。这样,拟定出的步态是稳定的。

三、全方位步态的可行性条件

在一个步态周期中有6个子过程。要使拟定出的步态是可行的,就必须使这6个子过程的每个子过程中每一时刻都可行。下面对各子过程给出可行性条件:(1).在 $t_0 \rightarrow t_1$ 子过程中,足(Ⅰ)从 A 点抬起落到 A' 点,故 A' 点必须在 t_1 时刻机体坐标中足(Ⅰ)的可达的矩形范围内。另外,三个足未离开地,着地点 B, C, D 必须在 t_1 时刻各足可达范围内。 B, C, D 三个点相对于机体在 $t_0 \rightarrow t_1$ 这段时间内作平移运动。故只在 t_0 和 t_1 两时刻该三点在相应足的矩形可达范围内,则每一时刻都是可行的。根据直线平移坐标变换得该子过程的可行性条件为:

$$\begin{cases} H \leq A'_z - x_{i1} + x_0 \leq H + l_1 \\ W \leq A'_y - y_{i1} + y_0 \leq W + l_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H - l_1 \leq B_z - x_{11} \leq -H \\ W \leq B_y - y_{11} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq C_z - x_{11} \leq -H \\ -W - l_2 \leq C_y - y_{11} \leq -W \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} H \leq D_z - x_{11} \leq H + l_1 \\ -W - l_2 \leq D_y - y_{11} \leq -W \end{cases} \quad (6)$$

其中 (A'_z, A'_y) , (B_z, B_y) , (C_z, C_y) , (D_z, D_y) 为 A' 、 B 、 C 和 D 点在 t_0 时刻机体坐标系 $0xy$ 中的坐标。 x_{11} , y_{11} 为直线段 $\overline{OQ_1}$ 在 t_0 时刻机体坐标系 $0xy$ 中 x 和 y 坐标轴上的投影； x_0 , y_0 为一个步态周期结束机体的重心应到达的点 O' 在 t_0 时刻机体坐标系 $0xy$ 中的坐标。

(2). 在 $t_2 \rightarrow t_3$ 子过程中, 因四个足均不抬起, 故可以 t_2 时刻四个着地点是否在各足的可行范围内写出如下不等式:

$$\begin{cases} H \leq A'_z + x_0 - x_{11} - x_{12} \leq H + l_1 \\ W \leq A'_y + y_0 - y_{11} - y_{12} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq B_z - x_{11} - x_{12} \leq -H \\ W \leq B_y - y_{11} - y_{12} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq C_z - x_{11} - x_{12} \leq -H \\ -W - l_2 \leq C_y - y_{11} - y_{12} \leq -W \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} H \leq D_z - x_{11} - x_{12} \leq H + l_1 \\ -W - l_2 \leq D_y - y_{11} - y_{12} \leq -W \end{cases} \quad (10)$$

其中 x_{12} , y_{12} 为直线段 $\overline{Q_1Q_2}$ 在 t_1 时刻机体坐标系中 x 和 y 坐标轴上的投影。

(3) $t_2 \rightarrow t_3$ 子过程中, 重心沿 \overline{OQ} 从 Q_2 点移动到 Q 点。足 (III) 从 C 点抬起落到 C' 点, 可行条件为:

$$\begin{cases} H \leq A'_z + x_0 - x_{11} - x_{12} - x_{13} \leq H + l_1 \\ W \leq A'_y + y_0 - y_{11} - y_{12} - y_{13} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq B_z - x_{11} - x_{12} - x_{13} \leq -H \\ W \leq B_y - y_{11} - y_{12} - y_{13} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq C'_z + x_0 - x_{11} - x_{12} - x_{13} \leq -H \\ -W - l_2 \leq C'_y + y_0 - y_{11} - y_{12} - y_{13} \leq -W \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} H \leq D_z - x_{11} - x_{12} - x_{13} \leq H + l_1 \\ -W \leq D_y - y_{11} - y_{12} - y_{13} \leq -W \end{cases} \quad (14)$$

其中 C'_z , C'_y 为 C' 点在 t_0 时刻机体坐标系 $0xy$ 中的坐标。 x_{13} , y_{13} 为 $\overline{Q_2Q}$ 直线段在 t_2 时刻机体

坐标系中 x 和 y 坐标轴上的投影。

(4) $t_3 \rightarrow t_4$ 子过程中,足(II)从 B 点抬起落到 B' 点。设 x_{i4}, y_{i4} 为重心移动直线距离 $\overline{QQ_3}$ 在 t_3 时刻机体坐标系 x 和 y 坐标轴上的投影, B'_z, B'_y 为 B' 点在 t_0 时刻机体坐标系中的坐标,可行条件为:

$$\begin{cases} H \leq A'_z + x_0 - \sum_{i=1}^4 x_{i4} \leq H + l_1 \\ W \leq A'_y + y_0 - \sum_{i=1}^4 y_{i4} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq B'_z + x_0 - \sum_{i=1}^4 x_{i4} \leq -H \\ W \leq B'_y + y_0 - \sum_{i=1}^4 y_{i4} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq C'_z + x_0 - \sum_{i=1}^4 x_{i4} \leq -H \\ -W - l_2 \leq C'_y + y_0 - \sum_{i=1}^4 y_{i4} \leq -W \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} H \leq D_z - \sum_{i=1}^4 x_{i4} \leq H + l_1 \\ -W - l_2 \leq D_y - \sum_{i=1}^4 y_{i4} \leq -W \end{cases} \quad (18)$$

(5). $t_4 \rightarrow t_5$ 子过程中,因四个足均不离地抬起,设直线段 $\overline{Q_3Q_4}$ 在 t_4 时刻机体坐标系中的 x 和 y 坐标轴上的投影为 x_{i4}, y_{i5} 。则可行性条件为:

$$\begin{cases} H \leq A'_z + x_0 - \sum_{i=1}^5 x_{i4} \leq H + l_1 \\ W \leq A'_y + y_0 - \sum_{i=1}^5 y_{i4} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq B'_z + x_0 - \sum_{i=1}^5 x'_{i4} \leq -H \\ W \leq B'_y + y_0 - \sum_{i=1}^5 y_{i4} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq C'_z + x_0 - \sum_{i=1}^5 x_{i4} \leq -H \\ -W - l_2 \leq C'_y + y_0 - \sum_{i=1}^5 y_{i4} \leq -W \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} H \leq D_x - \sum_{i=1}^5 x_{ii} \leq H + l_1 \\ -W - l_2 \leq D_y - \sum_{i=1}^5 y_{ii} \leq -W \end{cases} \quad (22)$$

(6). $t_5 \rightarrow t_6$ 子过程中, 足 (IV) 以 D 点抬起落到 D' 点。设 D'_x, D'_y 为 D' 点在 t_6 时刻机体坐标系中的坐标, x_{i6}, y_{i6} 为重心移动的距离 $\overline{Q_4 O'}$ 在 t_6 时刻机体坐标系中 x 和 y 坐标轴上的投影, 则可行条件为:

$$\begin{cases} H \leq A'_x + x_0 - \sum_{i=1}^6 x_{ii} \leq H + l_1 \\ W \leq A'_y + y_0 - \sum_{i=1}^6 y_{ii} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} -H - l_1 \leq B'_x + x_0 - \sum_{i=1}^6 x_{ii} \leq -H \\ W \leq B'_y + y_0 - \sum_{i=1}^6 y_{ii} \leq W + l_2 \end{cases} \quad (24)$$

$$-H - l_1 \leq C'_x + x_0 - \sum_{i=1}^6 x_{ii} \leq -H \quad (25)$$

$$-W - l_2 \leq C'_y + y_0 - \sum_{i=1}^6 y_{ii} \leq -W \quad (26)$$

以上给出了第一种抬跨足顺序的可行性条件。第二种抬跨足顺序的可行性条件同理给出, 这里省略。

四、垂直方向稳定性条件

从上述全方位步态的拟定过程知, 所拟定的步态是前进方向稳定的, 且稳定裕量 S_+ 。那么是否与前进方向相垂直的方向的垂直方向稳定裕量 $S_{\perp} > 0$? 从步态分析知, 每一步态周期的 t_3 时刻的 S_{\perp} 与 t_2, t_5 和 t_6 时刻的 S_{\perp} 相等且最小。故我们对全方位步态和 N 方向的规则步态的 t_3, t_2, t_5 和 t_6 各时刻都要求其垂直方向的稳定裕量 S_{\perp} 满足下式:

$$S_{\perp} \geq S_{\perp}^* \quad (27)$$

S_{\perp}^* 为给定垂直方向稳定裕量的最小值。

五、举例计算

我们用计算机来模拟步行机按本文所给的方法拟定出全方位步态行走过程。当我们按在 Q 点的可取值范围, 选取距 L_1 直线和到 L_2 直线的距离相等的点为 Q 点, 并让 Q 点到 L_1 直线的距离等于坐标原点 O 到 L_1 直线的距离, 结构参数 $l_1 = 30\text{cm}$, $l_2 = 30\text{cm}$; $H = 60\text{cm}$; $W = 80$

cm的条件下, 计算出全方位步态的步长 $\lambda = OO' = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$, 随新运动方向 N 与 y 坐标的夹角 θ 变化且满足可行性与稳定性条件的可取值域如图4阴影部分所示。图2中 θ_0 为避开角,

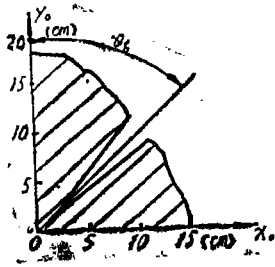


图4

当 $\theta = \theta_0$ 时 $S_{\perp} = 0$, 足(II)、足(IV)抬起时有失稳的危险。只要我们在图4阴影部分内选取 x_0 和 y_0 相应地 θ 也确定如方程(1)所示, 按本文所给的方法拟定步态行走就能保证步行机稳定地从原来的 y 坐标轴方向初始位置过渡到与 y 坐标轴的夹角为 θ 角的 N 方向的初始位置上去, 且能保证沿 N 方向规则步态顺利行走。

六、结 论

本文通过理论分析和计算机举例计算, 给出了四足步行机能全方位行走的一种步态拟定方法和可行的稳定步态。为四足步行机更好地适应环境提供了理论依据和方法。对四足步行机的步态控制有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Shigeo Hirose, The International Journal of Robotics Research. 3.No2.1984.
- [2] 孙汉旭, 《机器人》杂志, 第3期, 1988.
- [3] Tsvtian Lee and Chinglong Shih, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-2 No.2.1986.

Investigation of the Gait in All Position and Direction for Quadruped Walking Robot

Sun Hanxu Zhang Qixian Gan Dongying

(Tenth Dept, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

This paper investigates the problem of walking of quadruped walking robot in all position and direction. A designing method of a stable and realizab^le gait of walking robot in all position and direction has been given. The boundary of realizable stride length $\lambda = \sqrt{m^2 + n^2}$ and angle α between the motion direction and y -axis of frame coordinates system has been calculated by computer.

Key Words: Quadruped walking robot, All position and direction, Gait.