

步行机动力学操作性的研究 及机构参数的优化*

赵永生 杜永辉 赵铁石 黄真
(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 本文的目的是为研究步行机在目标空间的动力学性能提供一个系统的研究方法。文中引进了步行机的动力学操作椭圆和动力学操作性的性能指标。最后应用这个动力学性能指标对空间多关节六足步行机的机构参数进行了优化。

关键词 六足步行机 动力学操作性 参数优化

1 引言

多足步行机在行走时,步行机的支撑腿和躯体通过地面形成一个封闭的空间多环运动链位形。这个运动链具有冗余驱动的特性(我们称之为超确定输入^[1])。这种封闭的位形要引入更多的动力学耦合,并且系统的冗余驱动特性为系统提供了无限多的控制输入变化来实现躯体的给定运动。同时也为步行机的动力学研究增加了很大的困难。

本文在我们以前研究工作基础上,把多机械手协同工作系统的动力学操作椭圆和动力学操作性的性能指标引入到步行机的动力学分析中^[2],用以评价步行机在各种位形下实现躯体加速的能力。在我们原来所建立的空间多关节六足步行机的动力学协调方程的基础上^[1],建立和给出步行机动力学操作椭圆和动力学操作性指标的表达式。最后,根据该性能指标,通过数值计算对空间多关节六足步行机的机构参数进行了优化。

2 步行机的动力学模型

空间多关节六足步行机的机构简图如图1所示。该步行机具有六个完全相同的腿,每个腿

* 国家自然科学基金资助(59285041)

收稿日期:1997-08-21

具有三个驱动自由度。在支反力作用在摩擦锥内的条件下, 每个支撑腿与地面的接触点(落足点)可以简化为球副。这样该步行机行走时, 系统具有6个自由度。用运动影响系数法和虚功原理^[3-6], 步行机的动力学模型具有如下形式^[1]:

$$\tau_q = \sum_{r=1}^n \sum_{m=3}^5 \{J_q^{m,r}\}^T D_{m,r} + [J_q^0]^T D_0 - [J_q^s]^T \tau_s \quad (1)$$

这里 $\tau_q \in R^6$ 是广义关节驱动力矩向量, $D_{m,r} \in R^6$ 是第 r 个支撑腿第 m 个杆件的动载, $[J_q^{m,r}] \in R^{6 \times 6}$ 是系统广义坐标到固联于第 r 个支撑腿第 m 个杆件的动坐标系的影响系数矩阵(或称雅可比矩阵), $D_0 \in R^6$ 是躯体的动载, $[J_q^0] \in R^{6 \times 6}$ 是系统广义坐标到固联于躯体的动坐标系的影响系数矩阵(或称雅可比矩阵), $\tau_s \in R^{3n-6}$ 是系统非广义关节坐标的驱动力矩向量(也可看作是冗余驱动力矩), $[J_q^s] \in R^{(3n-6) \times 6}$ 是系统广义坐标到非广义坐标的影响系数矩阵(或称雅可比矩阵)。 $D_{m,r}$ 和 D_0 具有如下的形式。

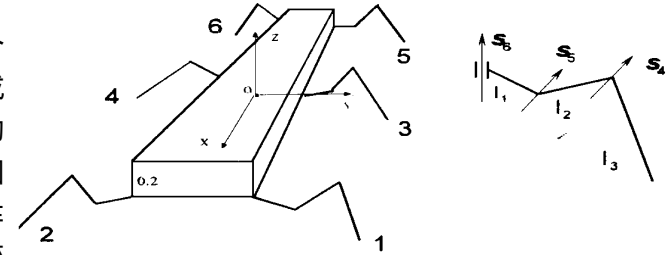


Fig. 1 Diagram of walking machine and its legs

$$D = - [R] a - Q \quad (2)$$

这里 $[R] = \begin{bmatrix} mI_2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$, $a = [r^T \ \dot{\omega}^T]^T$, $Q = \begin{bmatrix} -mg \\ \omega \times (I\omega) \end{bmatrix}$ 。式中 m 和 I 分别是杆件的质量和惯性矩阵, r 和 ω 分别是固联于杆件上动系原点的位置向量和杆件的角速度向量。 I_3 是 3×3 的单位矩阵。

3 目标空间的动力学分析

为了对步行机进行目标空间的动力学分析, 需要推导步行机躯体加速度与关节空间驱动力矩之间的映射关系。在此基础上引入步行机系统的动力学操作椭圆和动力学操作性指标。

3.1 建立躯体加速度与关节空间驱动力矩之间的映射矩阵

应用公式(1)和输入力矩加权最小平方判据, 我们可以实现步行机躯体动载在关节空间的直接分配。冗余驱动力矩向量 τ_s 具有如下形式^[1]:

$$\tau_s = - [A] \begin{bmatrix} n & 5 \\ r=1 & m=3 \end{bmatrix} \left[J_q^{m,r} \right]^T D_{m,r} + [J_q^0]^T D_0 \quad (3)$$

式中 $[A] = - [A_s] + [J_q^s][A_q][J_q^s]^T$, $[A_s] \in R^{(3n-6) \times (3n-6)}$ 和 $[A_q] \in R^{6 \times 6}$ 分别

是 τ 和 τ_i 的加权矩阵, 二者都是对角矩阵。将公式(3)代入到式(1)中, 有

$$\tau_q = \left[I_6 + [J_q^s]^T [A] \right] \cdot \left[\begin{matrix} n & 5 \\ r=1 & m=3 \end{matrix} [J_q^{m,r}]^T D_{m,r} \right] + \left[[J_q^s]^T [A] + I_6 \right] [J_q^0]^T D_0 \quad (4)$$

代入 D_0 的表达式到式(3)和式(4)中, 并整理有

$$\tau = [\Lambda] a_0 + \mu \quad (5)$$

式中 $a_0 = R^6$ 是躯体的加速度向量, 并且

$$\tau = \left\{ \begin{matrix} \tau_q \\ \tau \end{matrix} \right\} R^{3n} \quad (6)$$

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} - [[J_q^s]^T [A] + I_6] [J_q^0]^T [R_0] \\ [A] [J_q^0]^T [R_0] \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} [I_6 + [J_q^s]^T [A]] \left[\begin{matrix} n & 5 \\ r=1 & m=3 \end{matrix} [J_q^{m,r}]^T D_{m,r} \right] \\ - [A] \left[\begin{matrix} n & 5 \\ r=1 & m=3 \end{matrix} [J_q^{m,r}]^T D_{m,r} \right] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} - [[J_q^s]^T [A] + I_6] [J_q^0]^T Q_0 \\ [A] [J_q^0]^T Q_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $Q_0 = \begin{bmatrix} -m_0 g \\ \omega \times (I_0 \omega) \end{bmatrix}$ 。

从公式(7)可以看出, Λ 主要与躯体的动载和加权矩阵有关。

3.2 步行机的动力学操作椭圆

用 $\tau_{i, \max}$, $i = 1, \dots, 3n$, 表示支撑腿中各关节驱动力矩的最大值, 正则化的驱动力矩向量可用下式表示

$$\bar{\tau} = Z\tau \quad (9)$$

式中

$$Z = \text{diag}(Z_1 \dots Z_{3n}) \quad (10)$$

并且 $Z_i = 1/\tau_{i, \max}$, $i = 1, \dots, 3n$ 。

关节空间正则驱动力矩的单位球

$$\bar{\tau}^T \bar{\tau} = 1 \quad (11)$$

映射到目标空间中形成一个由躯体绝对加速度表示椭圆

$$a_0^T \bar{\Lambda} a_0 + 2a_0^T \bar{\Lambda}^T \bar{\mu} + \bar{\mu}^T \bar{\mu} = 1 \quad (12)$$

式中 $[\bar{\Lambda} = Z[\Lambda]$, $\bar{\mu} = Z\mu$ 。该式就是步行机的动力学操作椭圆。

步行机的动力学操作椭圆为分析步行机在各个位形下的目标空间动力学性能提供了一个系统和直接的工具。事实上, 操作椭圆的形状和方位就可看作是步行机在指定方向上加速躯体能力的度量指标。为了更方便地应用动力学操作椭圆的这种特性, 我们在下面引入评价动力

学操作性的性能指标。

3.3 动力学操作性指标

与其它系统相似,我们用映射矩阵 $[\Lambda]$ 的奇异值连乘积作为步行机目标空间动力学操作性的评价指标。

$$\omega = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_r \quad (13)$$

这里, $\sigma_i (i = 1, \dots, r)$ 是 $[\Lambda]$ 的奇异值。显然在一般的情况下, ω 的值越大, 动力学操作椭球的体积越大, 动力学操作椭球的体积越大, 则步行机的动力学操作性越好。

4 步行机机构参数的优化

为了设计的规范化, 在我们原来研究工作的基础上, 对空间多关节六足步行机的机构参数作了如下规定(如图1所示): 躯体的长宽高为 $2 \times 1 \times 0.2$; 躯体的质量为 10kg ; 使 l_1, l_2 和 l_3 满足下式

$$l_1 + l_2 + l_3 = 3 \quad \text{and} \quad l_1 \geq 1 \quad (14)$$

为避免特殊位形, 使1、2、5和6腿布置的稍微偏斜一点(见图2)。并取行走高度 $l_4 = 0.75 \times l_3$, 足宽尺寸 $l_5 = 1.25 \times (l_1 + l_2)$ 。在计算时取加权矩阵 $[A_s]$ 和 $[A_q]$ 为单位矩阵。为减少计算量, 计算时忽略了各腿中杆件的质量。

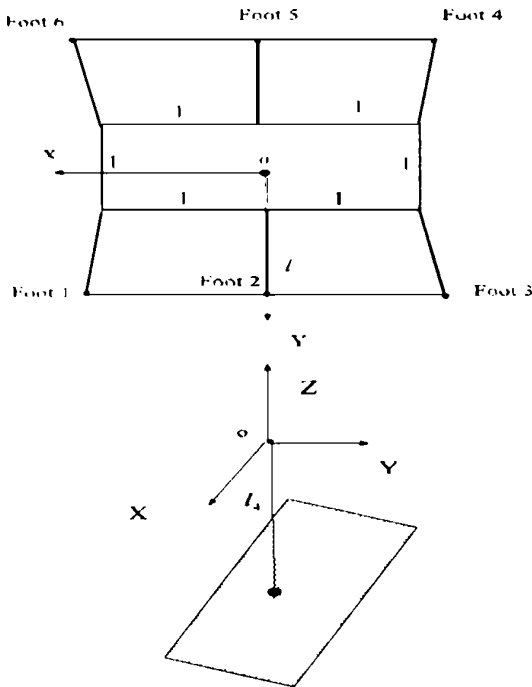


Fig. 2 Walking parameters

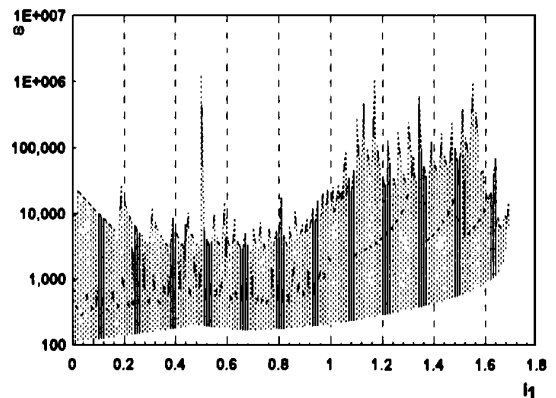


Fig. 3 X - Y plot of ω versus l_1

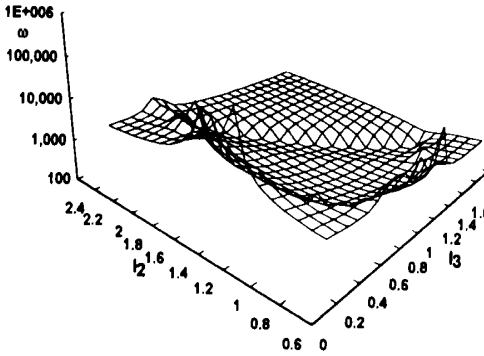


Fig. 4 Surface plot of ω versus l_2 and l_3

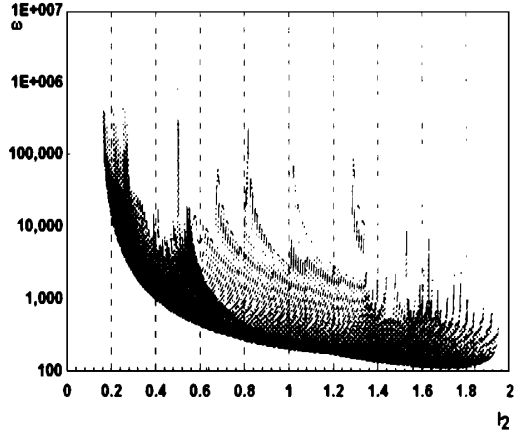


Fig. 5 X-Y plot of ω versus l_2

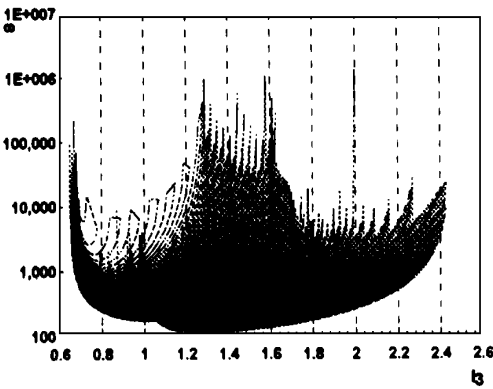


Fig. 6 X-Y plot of ω versus l_3

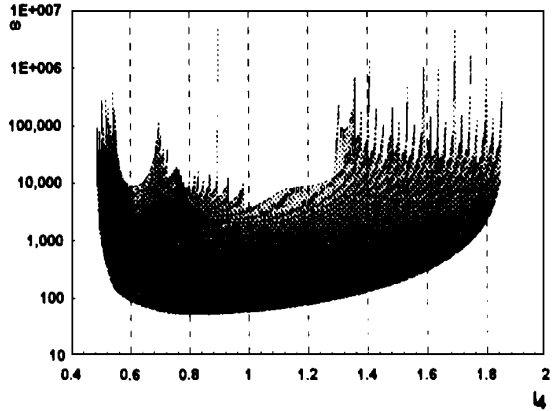


Fig. 7 X-Y plot of ω versus l_4

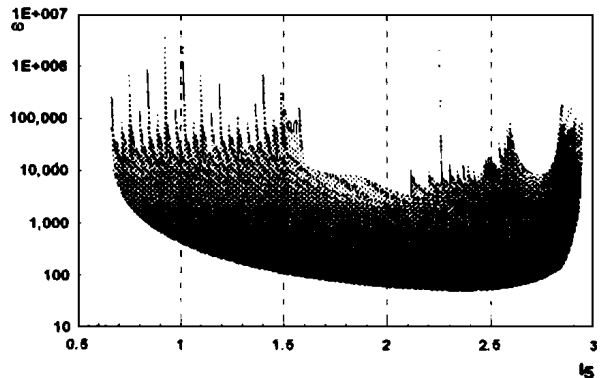


Fig. 8 X-Y plot of ω versus l_5

图3表示 ω 对应于 l_1 的线图。根据该线图, l_1 在 (0 ~ 1.6) 的范围内取值都具有较好的动力学操作性, 为获得好的动力学操作性, l_1 应在 (1.0 ~ 1.6) 的区间内取值。但从其它方面考虑 l_1 的值还是小一些为好。图4、图5和图6分别表示 ω 对应于 l_2 和 l_3 的三维曲线图和 X-Y 线图。从图中可看出, l_2 的取值范围在 (0.2 ~ 1.2) 及 l_3 的取值范围在 (1.2 ~ 1.7) 时, 步行机都具有较好的动力学操作性。图7和图8分别是 ω 对应于 l_4 和 l_5 的变化线图。从图中可看出, l_4 在 (0.5 ~ 1.8), l_5 在 (0.75 ~ 2.8) 的范围内取值时, 步行机也都具有较好的动力学操作性。

5 结 语

本文建立了步行机目标空间躯体的绝对加速度与关节空间驱动力矩之间的映射关系矩阵。建立了步行机的动力学操作椭圆,引入了动力学操作性的性能指标,为评价和分析步行机在各个位形下的目标空间动力学性能提供了一个系统和有效的工具。本文的理论和数值结果,对于步行机的设计和应用具有一定的推动作用和指导意义。

参 考 文 献

- 1 Huang, Zhao Y S. The Accordance and Optimization-distribution Equations of the Over-determinate Inputs of Walking Machine. *Int J of Mechanism and Machine Theory*, 1994, 29(2): 327 ~ 337
- 2 Chiacchio, Chraverini S, Sciavicco L, Siciliano B. Task Space Dynamic Analysis of Multiarm System Configurations. *Int J of Robotic Research*, 1991, 10(6): 708 ~ 715
- 3 Thomas, Tesar D. Dynamic Modeling of Serial Manipulator Arms. *ASME Tran on Dynamic System, Measurement Control*, 1982, 104(3): 218 ~ 228
- 4 Freeman, Tesar D. Dynamic Modeling for the Overconstrained Mode of Coordinated Multiple-manipulator Operation. *Proc Tenth U S National Congress of Applied Mechanics*, Austin, TX, June, 1986
- 5 Huang. Modeling Formulation of Six-DOF Multi-loop Parallel Manipulator: Part 1- kinematic Influence Coefficient. *Proc of Forth-IFTOMM Sym of Linkage and CAD Design Methods*, Paper 20, Vol. 2- 1, Romania, July, 1985
- 6 Huang. Modeling Formulation of Six-DOF Multi-loop Parallel Manipulator: Part 2- Dynamic Modeling and Example. *Proc of Forth-IFTOMM Sym. of Linkage and CAD Design Methods*, Paper 21, Vol. 2- 1, Romania, July, 1985

Dynamic Manipulability Analysis and Parameter Optimization of Walking Machine

ZHAO Yong-Sheng, DU Yong-Hui, ZHAO Tie-Shi, HUANG Zhen

(*Institute of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinxiangdao 066004*)

Abstract

The aim of this article is to provide a systematic method to perform dynamic analysis in the task space for walking machine. The dynamic manipulability ellipsoid is established and the Dynamic Manipulability Index is introduced. In the final, the walking machine's optimal mechanism and walking parameters are obtained through numerical analysis by using this index.

Key words: Six-legged walking machine, Dynamic manipulability, Parameter optimization

赵永生 男, 1962年生人, 副教授, 在职博士。主要从事机器人学领域的研究(包括并联机器人、多足步行机、多机械手协同系统等方向)。曾获国家教委科技进步一等奖一项、河北省科技进步二等奖一项, 参加完成国家自然科学基金、国家“863”等高科技研究课题6项, 在国际和国内各种科技刊物和会议上发表论文30余篇。