

步行机器人中稳定裕度的动态度量

袁群明 冯元琨

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要 本文分析了步行机器人中现有的两类稳定裕度的度量方法, 给出了一种既考虑步行机构及支撑地形特点, 又考虑步行速度因素影响的动态度量方法——机械能稳定裕度量。

关键词: 步行机器人 稳定裕度 动态步行

1 前言

稳定性在机器人的步行运动中是至关重要的, 尤其是在不能实现动态平衡控制的静稳定步行机器人系统中。McGhee 等给出了最短距离稳定裕度量方法, 但无法反映不同支撑地形结构, 运动速度惯量对步行运动稳定度的影响^[1,2]。D. A. Messuri 等提出了一种能量稳定裕度量方法, 其度量虽不再受步行机械和支撑地形特点的约束, 但仍未考虑运动惯量的影响^[3]。

考虑到步行机步行过程中速度有较大的变化, 也考虑到动态步行分析的需要, 我们在 D. A. Messuri 方法的基础上, 提出了一种机械能稳定裕度的度量方法。在该方法中考虑了步行机行进中动能对步行运动稳定裕度的影响, 进而使该方法成为既考虑了支撑地形及步行机结构, 又考虑了步行惯量对稳定裕度的影响, 是一种较完整的度量方法。以下将先分析前两种度量方法的利弊, 最后提出本文的方法。

2 两类度量方法的利弊分析

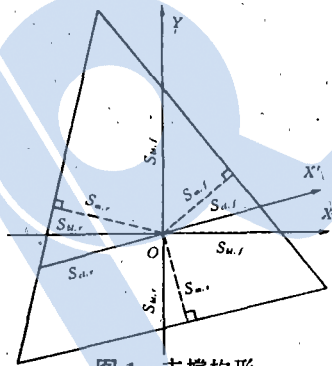


图1 支撑构形

2.1 最短距离法

该方法基于如下定义。

定义 1: 某一支撑状态的支撑构形是各支撑足在某一水平面上的投影所构成的凸形区域。

根据此支撑构形, 产生了各种关于稳定裕度的定义。设图 1 是对应某一支撑状态的支撑构形, 则其对应的三种稳定裕度的度量分别是:

- (1) 最短距离稳定裕度 σ_m : 是机体重心投影至支撑构形各边缘的最短距离:

$$\sigma_m = \min(S_{m,f}, S_{m,r}, S_{m,l})$$

- (2) 轴向最短距离稳定裕度 σ_b, σ_M , 即支撑构形截取坐标 X, Y 的最短距离:

$$\sigma_b = \min(S_{b,f}, S_{b,r})$$

$$\sigma_M = \min(S_{M,f}, S_{M,r})$$

- (3) 运动方向最短距离稳定裕度 σ_d , 即支撑构形在运动方向 X' 截取的最短距离:

$$\sigma_{cl} = \min(S_{cl,f}, S_{cl,r})$$

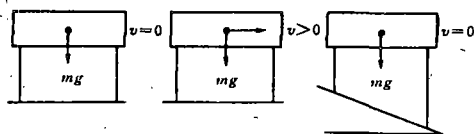


图2 几种情况下的稳定裕度

实际上图2所示的3种情况的实际稳定裕度是不同的。

2.2 势能稳定裕度量度方法

如图3所示,机体重心CG距两支撑边缘 F_1, F_2 虽然有相同的距离,但绕此两支撑边缘将机体翻转过所需作的功是有差异的。显然,向右翻转所需作功比向左翻转少,其差值

$$W_{左} - W_{右} = mg(h_1 - h_2) = mg \cdot \Delta h$$

故用此翻转所需作功(势能差)多少来衡量机体的稳定裕度更切实际些。D. A. Messuri 等给出了一般情况下的势能稳定的一种通用表达式。如图4所示, F_1, F_2 为某一支撑构形的某支撑边缘; R 为重心CG至支撑边缘 F_1, F_2 的垂线矢量; S_1 平面为包含支撑边缘且垂直于水平面的平面; R' 为 R 在 S_1 平面内的投影; h 则为将机体重心翻转过支撑边缘 F_1, F_2 时重心抬高的距离值。

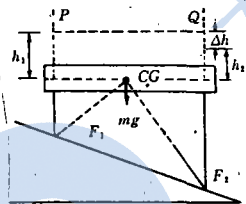


图3 机体翻转所需功

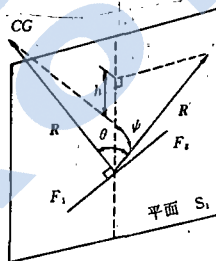


图4 势能稳定裕度的定义

则将机体重心翻转过支撑边缘 F_1, F_2 所需作功

$$PE = mgh, \quad h = |R|(1 - \cos\theta)\cos\psi$$

定义势能稳定裕度

$$\sigma_{PE} = \min(PE_i) = \min(mgh_i)$$

$h_i = |R_i|(1 - \cos\theta_i)\cos\psi_i; i=1, 2, \dots$ 表示某支撑构形的所有支撑边缘。

3 机械能稳定裕度量度

为了分析机械能稳定裕度量度可观察图5(a), (b)的情形。

我们注意到,即使相同大小的速度 v 和相同机构及支撑状态的步行机(如图5(a)~(c)),当速度的方向不同时,速度惯量的影响就不相同,即速度 v 所能产生的使步行机绕支撑边缘的翻转效果大小相异。假如速度 v 均在水平面内,且 $\alpha_2 > \alpha_1$,则,图5(a)中速度 v 所能产生的翻转效果最大,图5(b)中次之,图5(c)中再次之。

对于有相同大小和方向的运动速度的情况,若机构的特点不同,则运动速度所产生的翻转效果也不同。比较图5(a)和图5(d)两者的情形,后者速度的影响比前者大(假设 $h_2 > h_1$)。

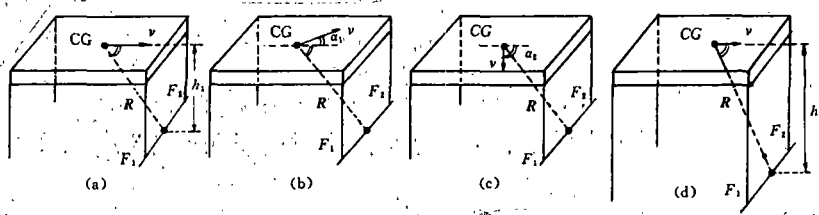


图 5 速度对稳定度的影响

从以上的分析易见,步行运动速度所产生的对运动稳定度的影响的大小,受影响于速度的大小及其方向与机体重心到支撑边缘垂线 R 之间的夹角的大小,真正促使机体绕支撑边缘翻转的有效速度是运动速度 v 在平面 S_2 内的投影速度再在 R 上的垂直速度分量,平面 S_2 为过垂线 R 且垂直于某支撑边缘 F_1F_2 的平面。

如图 6 所示, F_1F_2, R, CG 的定义同前. 所不同的矢量 R 的方向与前面图 4 中的相反(这并不影响问题的讨论,因为在方法 2 中仅用到矢量 R 的模值 $|R|$). v 为步行运动速度; v_p 为 v 在平面 S_2 内的投影; v_k 为 v_p 在平面内的与 R 相垂直的速度分量; 设 r 为 R 的单位矢量, f_1, f_2 为 F_1F_2 的单位矢量, 则有

$$v_p = v - (v \cdot f_1 f_2) f_1 f_2; v_k = v_p - (v_p \cdot r) r$$

故转动动能

$$KE = \frac{1}{2} m |v_k|^2$$

步行运动的速度对稳定裕度的影响有两种效果: 增加某些方向上的稳定裕度和减少某些方向上的稳定裕度, 这取决于运动方向及其与机构之间的相对关系。

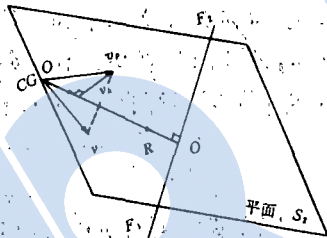


图 6 步行速度对稳定裕度的影响

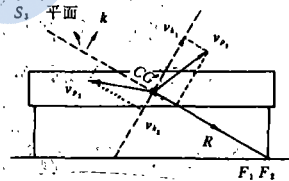


图 7 运动方向与机构相对关系对裕度的影响

如图 7 所示, 速度 v_{p1} 对机体绕支撑边缘 F_1F_2 的翻转运动作正功, 而速度 v_{p2} 对机体绕支撑边缘 F_1F_2 的翻转运动作负功. 前者减少步行机在该方向的稳定度, 而后者增加其稳定度. 实际上, 位于由矢量 R 和支撑边缘 F_1F_2 所构成平面 S_3 的上方的所有速度 v_{p1} , 因其有效速度(指对翻转作用而言)的分量 v_{k1} 的方向向上, 其对翻转运动作正功, 而位于 S_3 平面以下的速度, 则对翻转运动作负功。

设 K 是 S_3 平面的外法线矢量, 则位于 S_3 平面上下方, 以 CG 为始点的速度矢量分别有如下特征:

在平面 S_3 上方有: $v_k \cdot K > 0$

在平面 S_3 下方有: $v_k \cdot K < 0$

故可利用符号函数 $\text{sgn}(v_k \cdot K)$ 的正负来判定速度的翻转作用是减小还是增加机体稳定裕度, 当符号函数取正时, 减小稳定裕度, 反之, 则增大。

故, 以动能形式表示的相对于某支撑边缘的运动速度对机体稳定裕度的影响可表示为:

$$KE = -\frac{m}{2} \operatorname{sgn}(v_i \cdot K) |v_i|^2$$

综合前面介绍的第二种方法的势能稳定裕度量度和这里讨论的动能稳定裕度量度,我们得到一统一的,既适合于不平地支撑地形和机构特点,又适合于动态特性的机械能稳定裕度量度方法.

相对于某一支撑边缘的机械能稳定裕度有如下形式:

$$E = mg|R|(1 - \cos\theta)\cos\psi - \frac{m}{2} \operatorname{sgn}(v_i \cdot K) |v_i|^2$$

式中

$$v_i = v_p - (v_p \cdot r)r$$

$$v_p = v - (v \cdot f_1 f_2) f_1 f_2$$

故,对于某一支撑状态和运动速度 v 的机械能稳定裕度

$$\sigma_E = \min(E_i) \quad ; \quad (i = 1, 2, \dots \text{为所有的支撑边缘})$$

4 关于机械能稳定裕度量度方法的讨论

4.1 关于 σ_E 的含义

由于前两类稳定裕度的度量方法不考虑运动速度的影响, σ_{PE} 是一种静态的度量. 在机械能稳定裕度的度量方法中, 稳定裕度 σ_E 的意义有所不同. 对于 σ_E 大于、小于和等于零这三种情况下的瞬时支撑状态都是存在的. σ_E 的意义在于表明运动的步行机体承受干扰而不失去平衡的能力的大小.

4.2 关于最大稳定裕度

从前面讨论的两类稳定裕度的表达式中可见, 影响步行机体稳定裕度的因素为步行机构和支撑地形, 因支撑地形是不可改变的, 故只有通过改变步行机腿的支撑状态来提高其稳定裕度. 而从机械能稳定裕度的度量方法中可知, 还可通过改变步行运动的速度来提高某些方向的稳定裕度. 如, 对于沿斜坡上行的步行机, 可通过增加步行速度来削弱步行机沿斜坡向 F 翻倒的趋势.

4.3 关于机械能稳定裕度量度方法的意义

由于该度量方法是一种动态的度量, 是对步行机动态步行研究所不可缺少的. 通过对动态步行过程中各支撑状态以及各动态步态过渡时的机械能稳定裕度的分析, 我们可以从中发现动态步行运动的规律, 进而可为我们对动态步行的控制提供指导. 关于这部分工作, 本文作者正在进行之中.

参 考 文 献

- 1 McGhee R B, Frank A A. On the stability of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 1968, 3(3), 331-351
- 2 McGhee R B, Iswandhi G I. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain. *IEEE Trans Syst, Man, Cybern*, 1979, SMC-9(4), 176-182
- 3 Messuri D A, Klein C A. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion. *IEEE J of Robotics and Automation*, 1986, RA-1(3)

(下转第 58 页)

- 16 濑山户等. 多层神经回路网内に学习とれみ逆ダイナミクスモデルにまるマニピュレータの制御. 信学技法, 1988, 135, 249-256
- 17 Helferty J *et al.* Adaptive control of a legged robot using a multilayer connectionist network. Proc. SPIE Mobile Robots, 1989, 1195, 180-91
- 18 Sanner R. Neural morphic pitch attitude regulation of an underwater telerobot. IEEE Control System Magazine, 1990, 10(3), 62-57
- 19 Danilo B. High precision position control by catisian trajectory feedback and connectinist inverse dynamics feedward. IJCNN, 1988, 325-31
- 20 Ciliz K. Artificial neural network based control of nonlinear systems with application to robotic manipulators. Ph. D. Thesis, Syracuse Univ, 1990
- 21 Leahy M *et al.* Neural network payload estimation for adaptive robot control. IEEE Trans Neural Networks, 1991, 2(1), 93-100
- 22 Miller W T *et al.* Realtime dynamic control of an industrial manipulator using a neural network based learning controller. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1990, 6(1), 1-9
- 23 Guez A *et al.* Neural morphic architecture adaptive robot control, a preliminary analysis. In: IEEE Conf on Neural Networks, 1987, 2, 567-572
- 24 Kuperstein M. Generalized neural model for adaptive sensory motor control of single posture. In: IEEE Conf on Robotics and Automation, 1988, 1, 140-144
- 25 王正志等. M. R. S 自组织三维神经网络的改进及其在机器人控制中的应用. 自动化学报, 1992, 18(1), 9-14
- 26 Jodan M. Interminate motor skill learning problems. Attention and Performance, VII, MIT Press, 1989
- 27 Kawato *et al.* Trajectory formation of arm movement by cascade neural network model based on minimum torque-change criterion. Biol Cybern, 1990, 62(2), 275-89

(本文第一作者金耀初, 男, 26岁, 讲师)

(上接第48页)

ON THE DYNAMIC MEASURING OF STABILITY MARGIN OF LEGGED LOCOMOTION

YUAN Qunming FENG Yuankun

(Dept of Automation, Tsinghua Univ, Beijing 100084)

Abstract

A brief discussion and comparison on the existing methods of measuring the stability margin on legged locomotion is given in this paper. Based on these methods, an improved and dynamic measuring criterion, i. e. the mechanical energy stability margin, is presented. The new criterion of measuring takes into account both the characteristics of supporting ground and the dynamic effects of walking velocity on legged robot. The new measuring is of great importance to the researches on dynamic walking.

Key words: legged robot stability margin dynamic walking

(本文第一作者袁群明, 男, 27岁, 博士生)