

仿蟹机器人行走稳定性判定方法^①王立权^{②*} 王海龙^{③*} 陈 曦^{**}

(* 哈尔滨工程大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

(** 哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001)

摘 要 为了准确评价仿蟹机器人的行走稳定性及稳定裕度,提出了一种适用于多足机器人动态稳定性的判定方法。该方法首先分析引起机器人行走倾翻的各种干扰项,利用三维力传感器测量足端落地时的接触力,根据达朗贝尔原理将其向机器人质心等效获得质心点倾翻合力;然后结合实验得到八足仿蟹机器人质心波动,通过解空间矢量方程得到倾翻轴垂线矢量;最后将倾翻合力与倾翻轴垂线矢量相结合建立起力角稳定裕量(FASM)的数学模型,以归一化 FASM 的大小来间接判定机器人的稳定性。仿真和实验结果表明,该方法能够准确判定仿蟹机器人行走稳定性并动态显示稳定裕度变化。

关键词 仿蟹机器人, 倾翻稳定性, 稳定锥, 力角稳定裕量(FASM)

0 引 言

仿生技术在机器人科学中的应用,必将推动足式机器人的适应能力向非结构化、未知复杂的环境发展,这样,对多足机器人的运动稳定性要求会更高^[1]。采用准确的参数评估足式机器人的稳定性对于机器人的结构设计、步态拟定、足尖点轨迹规划及抗扰性是至关重要的^[2-5]。McGhee 和 Frank 于 1968 年提出了重心投影法^[6],即最早的静态稳定性判别方法,该方法的不足之处是只能评估机器人在平坦地面上的稳定性,对非平坦路面则无能为力。随后,McGhee 和 Iswandhi 在重心投影法的基础上提出了一种能够适用于非平坦地面的稳定性度量方法,即静态稳定边界(SSM)^[7]法,该方法的缺点是未能考虑势能大小等约束因素的影响^[7]。为了更好地描述静态稳定性,Messuri 和 Klein 于 1985 年提出了规范化能量稳定裕度(normalized energy stability margin, NESM)法,该方法将机器人当前势能与倾倒过程中最大的势能差作为稳定裕量衡量准则,无论对平坦路面还是非平坦的路面都是最适宜的。但是 NESM 函数中没有体现外界的干扰项^[8]。相对

于机器人静态稳定性判据,动态稳定性判据发展比较缓慢。Papadopoulos 和 Rey 于 1996 年提出了力角稳定裕量(force-angle stability margin, FASM)^[9],将它作为评估机器人在平坦路面上有惯性情况下的动态稳定性的判据是最合适的,但是这种方法同样忽略了外界干扰力矩项^[9,10]。其他方法如动态稳定边界(DSM)法^[11]、倾倒稳定性判别(TSJ)法^[12]、有效质量中心(EMC)法^[13]等均是无效的。综上所述,现有的几种动静稳定性评价方法都有其局限性,没有普遍意义。为了克服上述方法的不足,本文对 FASM 方法进行了改进,全面考虑了引起机器人倾翻的各种干扰项,同时结合质心波动量对稳定性的影响,建立了适用于复杂环境下行走的多足机器人的稳定性判定方法,并给出了应用实例。实验表明,该方法能够准确给出仿蟹机器人运动过程中稳定裕量的动态变化。

1 仿蟹机器人

仿蟹机器人以横向行走为主要的行走方式,为提高行走效率、简化结构、降低能耗,整体上采用 8 条步行足,且采用平行对称分布,如图 1 所示^[14]。

① 国家自然科学基金(60875067)和黑龙江省自然科学基金(ZD200911)资助项目。

② 男,1957 年生,博士,教授;研究方向:仿生机器人系统,水下智能作业技术,机电一体化技术;E-mail: wangliquan@hrbeu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: wanghailong@hrbeu.edu.cn

(收稿日期:2012-03-07)

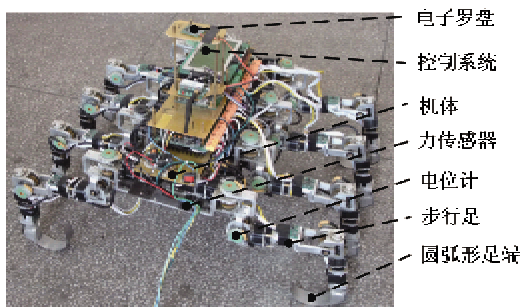


图1 仿蟹机器人样机

仿蟹机器人主要由机体和步行足两部分组成。控制系统固放机体上,其包括了定位导航模块、无线遥控模块、液晶显示模块、电机驱动模块等。步行足由根节、股节、胫节三部分组成,每个关节都配置了电位计用于检测各关节的转角,特殊的圆弧形指节结构使机器人在运动过程中产生类似滚动的效果,使运动更加平稳,而且材料的刚度较低,在运动过程中起被动柔顺性作用,减缓步行足与地面的冲击^[15]。

2 仿蟹机器人运动性能分析

落足点和质心的相对位置对机器人的稳定性有着至关重要的影响,因此本节首先在机体坐标系中描述足尖点的位置。以机器人重心在支撑面的垂直投影点为坐标系原点,建立仿蟹机器人固定坐标系 $Ox_0y_0z_0$, 步行足的两端分别与机体和地面的 A_i 点和 B_i 点 ($i = 1, 2, \dots, 8$) 相连,在机体质心处建立机体坐标系 $Cx_cy_cz_c$, 如图 2 所示。由坐标变换可知,任意步行足在机体坐标系中的位置矩阵为

$$P_c^{B_i} = P_c^{A_i} + P_{A_i}^{B_i} \quad (1)$$

式中, A_i 在机体坐标系的位置矢量 $P_c^{A_i}$ 固定不变,只要知道 A_i 相对于 B_i 的位置矢量 $P_{A_i}^{B_i}$, 带入此式即可得到任意落足点在机体坐标系中的位置矢量。

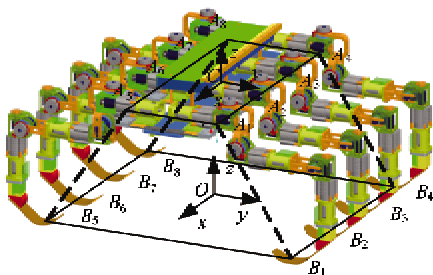


图2 仿蟹机器人机体坐标系

欲求 A_i 相对于 B_i 的位置, 可以将单步行足看成串联机械臂结构, 采用下关节法建立机器人单步行足关节坐标系, 根据 D-H 坐标变化法则可得足尖点在机体坐标系中的位姿变换矩阵为

$${}^4_0T = {}^1_0T_1 {}^2_1T_2 {}^3_2T_3 {}^4_3T_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[p'_x \ p'_y \ p'_z]^T$ 为足尖点在单腿局部坐标系中位置矢量, $[n_x \ n_y \ n_z]^T$ 、 $[o_x \ o_y \ o_z]^T$ 、 $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 分别为足尖坐标系的 x 轴、 y 轴和 z 轴在单腿局部坐标系中方向矢量。满足上面等式成立, 矩阵的对应项相等, 可以得到足尖点坐标为

$$\begin{cases} p'_x = (c\theta_1 s\theta_2 c\theta_3 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3)l_3 + c\theta_1(c\theta_2 l_2 + l_1) \\ p'_y = (s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + s\theta_1 s\theta_2 c\theta_3)l_3 + s\theta_1(c\theta_2 l_2 + l_1) \\ p'_z = (s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3)l_3 + s\theta_2 l_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中的 s 和 c 分别代表 $\sin$ 和 $\cos$, l_1 、 l_2 、 l_3 分别为根节、股节、胫节的长度, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 为三个关节相对转角。

$A_i = [x \ y \ z]^T (i = 1, 2, \dots, 8)$ 为步行足与机体连接点在机体坐标系 $Cx_cy_cz_c$ 中的位置矢量, 将其带入公式(1), 可得出任意落足点在机体局部参考坐标系中的位置矢量 $P_i = [p_x \ p_y \ p_z]^T (i = 1, 2, \dots, 8)$, 即

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

3 多足机器人倾翻稳定性分析

建立一个合理的足式机器人稳定性评价标准对于机器人的结构设计和运动控制都是必要的。针对不同的使用背景所选用的评判标准也是不一样的, 如采用了错误的评判标准, 机器人运动可能受到限制, 同时可能出现机器人倾翻从而导致作业的失败。本文所设计的仿蟹机器人运动速度较低, 针对复杂环境的作业任务, 因此选择 FASM 作为稳定性的评价标准。

3.1 多足机器人倾翻合力

在实际的情况下足式机器人运动中常遇到操作时的冲击力、加速度、动量、地形的干扰, 如果在稳定

性研究中不充分考虑上述各种情况的影响,将很难得到具有普遍意义的稳定性准则,为使该研究具有一般性,假设仿蟹机器人处于加速运动状态,机器人同时承受重力、操纵力和操纵力矩的作用,并且有来自外界的干扰力。根据 Alembert 原理,对仿蟹机器人进行动力学分析,可以得到如下力平衡方程:

$$\sum \mathbf{f}_{\text{inertial}} = \sum \mathbf{f}_{\text{grav}} + \sum \mathbf{f}_{\text{mainp}} + \sum \mathbf{f}_{\text{support}} + \sum \mathbf{f}_{\text{dist}} \quad (5)$$

$$\sum \mathbf{n}_{\text{inertial}} = \sum \mathbf{n}_{\text{grav}} + \sum \mathbf{n}_{\text{mainp}} + \sum \mathbf{n}_{\text{support}} + \sum \mathbf{n}_{\text{dist}} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{f}_{\text{inertial}}$ 、 $\mathbf{n}_{\text{inertial}}$ 分别为惯性力、惯性力矩; $\mathbf{f}_{\text{grav}}$ 、 $\mathbf{n}_{\text{grav}}$ 分别为机器人重力和由重力产生的力矩; $\mathbf{f}_{\text{mainp}}$ 、 $\mathbf{n}_{\text{mainp}}$ 分别为操纵力、操纵力矩; $\mathbf{f}_{\text{dist}}$ 、 $\mathbf{n}_{\text{dist}}$ 分别为来自于系统外部的干扰力、干扰力矩; $\mathbf{f}_{\text{support}}$ 、 $\mathbf{n}_{\text{support}}$ 分别为地面对支撑足的反作用力、反作用力矩。其中足式机器人惯性力和力矩可用下式进行计算:

$$\sum \mathbf{f}_{\text{inertial}} = m_b \ddot{\mathbf{c}}_b^e + \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^3 m_{ij} \ddot{\mathbf{c}}_{ij}^e \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{n}_{\text{inertial}} = & \boldsymbol{\omega}^{eb} \times \mathbf{A}^{eb} \mathbf{I}_b \mathbf{A}^{be} \boldsymbol{\omega}^{eb} + \mathbf{A}^{eb} \mathbf{I}_b \mathbf{A}^{be} \boldsymbol{\alpha}^{eb} \\ & + \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^3 [m_{ij} \mathbf{c}_{ij}^e + \mathbf{T}_{ij}^e] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 m_b 表示机器人机体的质量; m_{ij} 为腿节的质量; $\mathbf{I}_b$ 为机体的转动惯量; $\ddot{\mathbf{c}}_b^e$ 为机体质心点线加速度; $\boldsymbol{\omega}^{eb}$ 和 $\boldsymbol{\alpha}^{eb}$ 分别是机体的角速度和角加速度; $\mathbf{c}_{ij}^e$ 是从质心指向各腿节的位置矢量; 下标 i 和 j 分别表示腿节序数和步行足序数; $\mathbf{A}^{eb}$ 和 $\mathbf{A}^{be}$ 是机体质心坐标系与整体坐标系之间的变换矩阵; $\mathbf{T}_{ij}^e$ 表示由于腿节 i 的摆动而作用在系统上的力矩。

将式(5)、(6)变形,得到引起机器人不稳定的倾翻合力和合力矩分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_r &= \sum (\mathbf{f}_{\text{grav}} + \mathbf{f}_{\text{mainp}} + \mathbf{f}_{\text{dist}} - \mathbf{f}_{\text{inertial}}) \\ &= - \sum \mathbf{f}_{\text{support}} \end{aligned} \quad (9)$$

和

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_r &= \sum (\mathbf{n}_{\text{grav}} + \mathbf{n}_{\text{mainp}} + \mathbf{n}_{\text{dist}} - \mathbf{n}_{\text{inertial}}) \\ &= - \sum \mathbf{n}_{\text{support}} \end{aligned} \quad (10)$$

倾翻合力的获得方法有两种,一种是通过式(9)、(10)前部分等式直接求和获得,另外一种是根据式(9)和(10)后部分等式首先将足端反力矢量向质心等效,然后求各等效反力矢量和间接获得倾翻合力,本文采用的是后者。假设第 i 个落地足受地面的反作用力矢量为 $\mathbf{F}_i = [F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}]^T$, 将三

维力传感器检测的力分量向机器人重心简化,可通过下式求出引起机器人产生绕边线和足尖点倾翻的合力 $\mathbf{f}_r$ 和合力矩 $\mathbf{n}_r$:

$$\mathbf{f}_r = \sum_{i=1}^8 \mathbf{F}_{ix} + \sum_{i=1}^8 \mathbf{F}_{iy} + \sum_{i=1}^8 \mathbf{F}_{iz} \quad (11)$$

$$\mathbf{n}_r = \sum_{i=1}^8 ((\mathbf{F}_{ix} + \mathbf{F}_{iy} + \mathbf{F}_{iz}) \times \mathbf{P}_i) \quad (12)$$

3.2 倾翻稳定性分析

本研究讨论八足机器人最常采用的双四足步态,运动过程的一般形式如图3所示(其他步态可以采用相同的研究方法)。当机器人处于运动状态中,落地足在支撑面上形成了一个外凸的支撑多边形,用 $\mathbf{L}_i = [L_{ix}, L_{iy}, L_{iz}]^T$ 表示第 i 个落足点在机体局部参考坐标系中的位置矢量,由式(3)可求得。

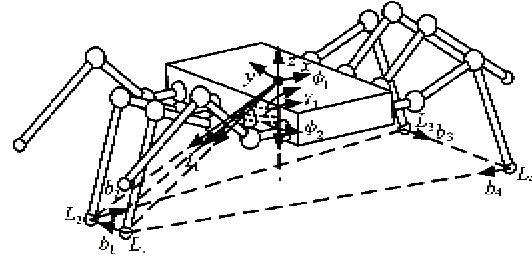


图3 仿蟹机器人稳定裕度计算简图

选取相邻落足点与地面接触的连线作为机器人可能绕其翻转的轴线,这些轴线组成了支撑多边形,第 i 条翻转轴线记为

$$b_i = \begin{cases} L_{i+1} - L_i, & i = 1, 2, \dots, m-1 \\ L_1 - L_m, & i = m \end{cases} \quad (13)$$

其中 m 为落地足数目。在此对转轴矢量进行单位化 $\hat{b} = b / \|b\|$ 。过多足机器人的重心与旋转轴相垂直的直线为 $\mathbf{I}_i = (1 - \hat{b} \hat{b}^T) L_{i+1}$, 单位化后用 $\hat{I}_i$ 表示。

对于一个给定的旋转轴, $\mathbf{f}_r$ 和 $\mathbf{n}_r$ 引起机器人发生倾翻的总合力可由下式计算:

$$\mathbf{f}'_i = (1 - \hat{b} \hat{b}^T) \mathbf{f}_r + \hat{I}_i \times (\hat{b} \hat{b}^T \mathbf{n}_r) / \|\hat{I}_i\| \quad (14)$$

多足机器人绕边线倾翻稳定角可由倾翻合力 $\mathbf{f}'_i$ 与倾翻轴的垂线 $\mathbf{I}_i$ 之间夹角计算得出:

$$\gamma_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{f}'_i \hat{I}_i) \quad i = \{1, 2, \dots, m\} \quad (15)$$

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & (\mathbf{I}_i \times \mathbf{f}'_i) \hat{a}_i < 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

机器人绕落足点倾翻稳定角可由倾翻的合力 $\mathbf{f}'_i$ 与足尖点矢量 $\mathbf{L}_i$ 之间夹角的计算得出:

$$\varphi_i = \varepsilon_i \cos^{-1}(\hat{f}'_i \cdot \hat{L}_i) \quad i = \{1, 2, \dots, m\} \quad (17)$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} +1 & (L_i \times f'_i) \cdot \hat{a}_i < 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

综合绕边线和绕足尖点倾翻两种情况,仿蟹机器人力角稳定裕量(FASM)简单的定义形式如下^[8]:

$$a = \min(\theta_i) \|f'_i\| \quad \theta_i = \{\gamma_{i-1}, \varphi_i, \gamma_i\} \quad (19)$$

式中 $i = 2, 3, \dots, m$ 。

为了更好地衡量机器人运动过程中稳定裕量的变化,对 FASM 进行归一化处理:

$$\hat{a} = \frac{\min(\theta_i) \|f'_i\|}{\|\theta_{i_{nom}}\| \|f'_{i_{nom}}\|} \quad (20)$$

式中的 $\theta_{i_{nom}}$ 和 $f'_{i_{nom}}$ 是仿蟹机器人在水平地面上运动身体姿态处于初始状态时测量值。

式(20)这个标量 $\hat{a}$ 是对机器人运动过程中的瞬时稳定性的度量,当 $\hat{a}$ 为正值的情况下,倾翻力的合力 f'_i 处于倾翻轴法线 L_i 所构成的锥体内,标量 $\hat{a}$ 的大小为多足机器人系统的稳定裕量, $\hat{a}$ 越大代表系统越稳定,抵抗外界扰动发生倾翻的能力越强; $\hat{a} = 0$ 系统处于临界稳定状态,合力 f'_i 和倾翻轴法线 L_i 在同一直线上;如果 $\hat{a}$ 为负数,那么系统是不稳定的状态,机器人将会出现倾翻现象。

3.3 适用于多足机器人稳定裕量计算方法

结合文献[16]提出的稳定锥的定义,取落足点作为稳定锥的角点,由这些点连成的凸多边形为稳定锥的底面,机器人的重心为稳定锥的顶点,如图4所示。足式机器人采用某一周期步态运动时,在每组足处于支撑相阶段,稳定锥的底面是固定不变的,变化的是质心的位置和等效的倾翻合力 f'_i 的方向,从而引起机器人稳定裕度的变化。通过3.1节倾翻合力分析可知,外界各种干扰项都会对倾翻合力的大小和方向产生影响,综合考虑后用 f'_s 表示,在图中其沿 z 轴的负方向^[16]。因此对于多足机器人行

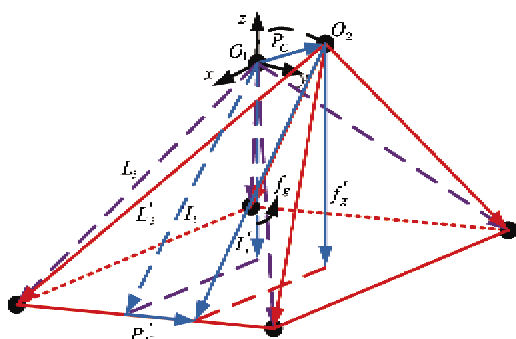


图4 仿蟹机器人稳定锥

走过程中 FASM 的影响主要是质心位置的变化导致倾翻轴垂线 L_i 和棱锥边线 L_i 变化,如果能求出运动过程中任意时刻的倾翻轴垂线矢量 L'_i 和边线 L'_i , 那么就可以得出整个运动过程中 FASM,从而可判断机器人的稳定性。

如图4所示,仿蟹机器人在支撑足与地面相互作用下机体重心从初始位置 O_1 沿任意轨迹运动到位置 O_2 , 矢量 P_c 从位置 O_1 指向位置 O_2 , P'_c 为矢量 P_c 在翻滚旋转轴方向的垂直投影,根据空间矢量多边形法则可得:

$$\begin{cases} L'_i = L_i - P_c + P'_c \\ L'_i = L_i + P \end{cases} \quad (21)$$

式中 $P'_c = P_c a / \|a\|$, L'_i 和 L'_i 为位置 O'_2 对应的倾翻轴垂线矢量和棱锥边线。

要求出一个多足机器人在运动过程中力角稳定裕量(FASM)的变化,只要知道运动中质心的波动情况将其带入式(20)就可以了。

4 仿真分析

为了更直观地对上面提出的 FASM 计算方法进行理解,下面给出一个具体的例子:仿蟹机器人以双四足步态行走,绘制仿蟹机器人稳定锥如图5所示。机器人指节采用的是圆弧形足端结构,最有可能存在顺着圆弧方向的翻滚,因此在这里只考虑行走方向上的稳定性。计算机器人行行走方向倾翻的稳定裕量需要在稳定锥中间剖切面测量任意瞬时力矢量与倾翻轴垂线矢量之间夹角 θ_1 和 θ_2 的大小。

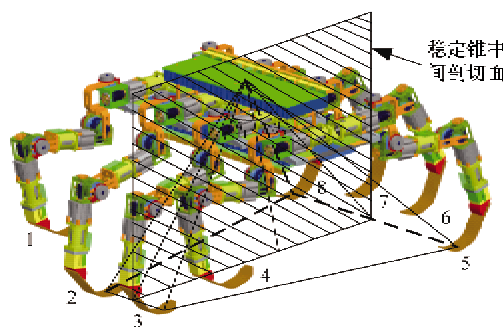


图5 双四足步态行走下机器人稳定锥

取出稳定锥中间剖切平面对机器人行走过程中稳定性进行研究(如图6所示)。仿蟹机器人足端特殊的圆弧形足端结构,使机器人在行走过程中始终保持前后着地足之间的跨距 L (身体两侧落足点沿前进方向距离)不变,令机器人步距为 λ , 步态周期为 T , 单步行程为 L_1 , 由图可知 $\lambda = 2L_1$, 初始时

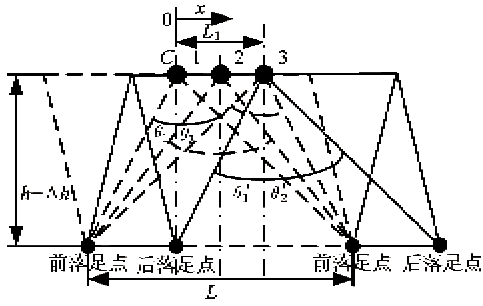


图6 仿蟹机器人行走状态下稳定裕度变化

刻机器人质心高度为 h ，质心在半个步态周期从位置1运动到位置3，位置2为前后支撑足所形成跨距的中点。

机器人在实际直线行走的过程中质心可能出现两个方向的运动，即沿前进方向和垂直于机体的方向，其波动量分别用 Δh 、 x 表示。根据前面提出的稳定裕量的计算方法可知，机器人在行走过程中FASM的计算公式如下：

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{L/2 - L_1/2 + x}{h + \Delta h}\right) \\ \theta_2 = \arctan\left(\frac{L/2 - L_1/2 - x}{h + \Delta h}\right) \end{cases} \quad 0 \leq x \leq L_1 \quad (22)$$

$$\hat{a} = \frac{\min(\theta_1, \theta_2) \|f_r'\|}{\|\theta_{nom}\| \|f_{z,nom}\|} \quad (23)$$

为了得到机器人理想运动过程中稳定裕量的变化，作如下假设：

(1) 直线运动中，质心无垂直机体方向的波动，即任意时刻 $\Delta h = 0$ ；

(2) 前后落足点之间距离为半个步距长 L_1 （步行足切换时FASM无突变）；

(3) 倾翻合力的方向沿重力方向，大小与机器人所受重力相等（静稳定性问题）。

使用MATLAB仿真软件进行机器人运动仿真，得到了仿蟹机器人运动速度为100mm/s下归一化稳定裕度的变化曲线，如图7所示。由图可知其变化呈现周期性，其周期为步态周期的一半，在步态的0-1/2周期内，质心由1点向2点运动稳定裕量逐渐增大，2点到3点逐渐减小，在2点稳定性达到最佳，这与重心投影法得到的结果完全相同，验证了本文提出方法的有效性^[6]。整个运动过程中稳定裕量的最大下降幅度为20%，而且时刻保持其值大于零，机器人不会出现前后倾翻的现象。

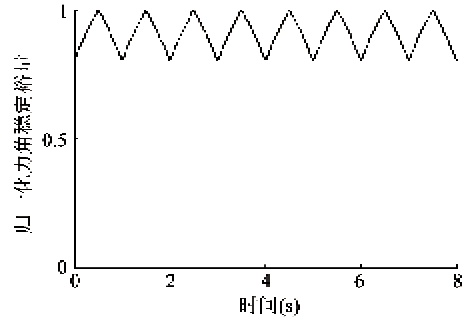
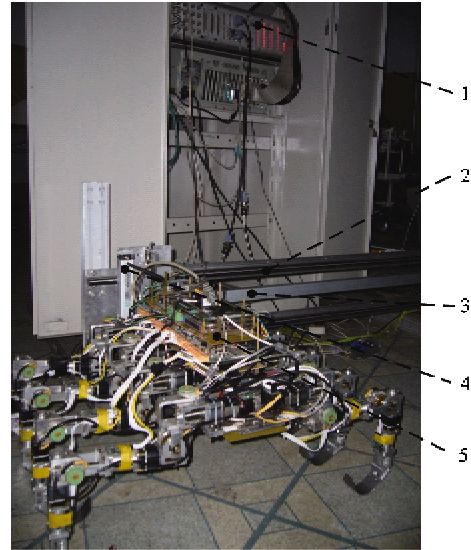


图7 理想机器人归一化稳定裕度曲线

5 行走稳定性实验

为验证前面分析的正确性，将仿蟹机器人与两自由度测量平台相连，结合行走中质心波动计算现实情况下机器人行走过程中的稳定裕量，实验平台如图8所示。 x 轴和 z 轴方向的光栅尺用于测量机器人行走过程中质心位置的变化，实验数据通过dSPACE半物理仿真平台进行实时采集。



1. dSPACE半物理仿真平台；2. 实验平台；
3. x 轴光栅尺；4. z 轴光栅尺；5. 仿蟹机器人样机

图8 仿蟹机器人实验系统

仿蟹机器人采用双四足步态行走，对等步长条件下80mm/s、100mm/s、125mm/s三种速度的质心波动量进行测量，图9所示为采集到的三种速度下质心波动量。

应用本文提出的稳定裕度的计算公式(22)、(23)对机器人行走过程中稳定裕量的变化曲线进行求解，公式中的 x 和 Δh 分别对应上面的 x 向和 z 向的质心波动量。实验中无外界的干扰， $\|f_{i,nom}\|$ 大小等于机器人的重力，最终得到的归一化FASM

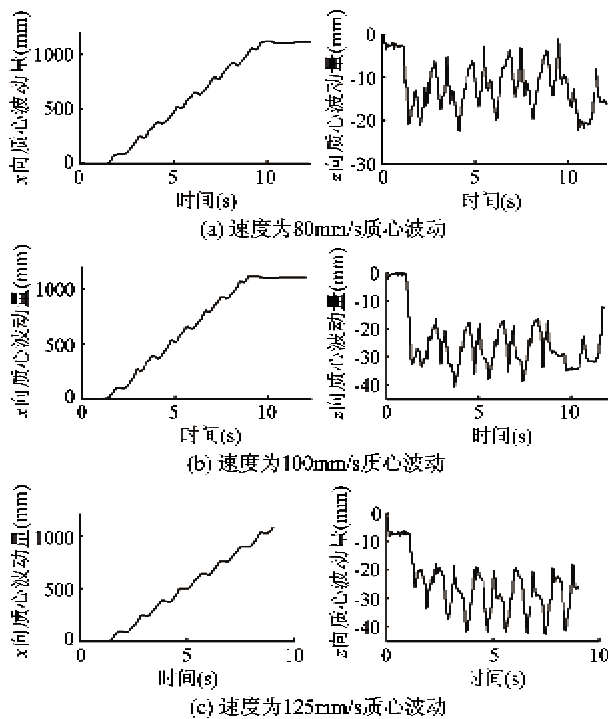


图9 三种不同速度下质心位移变化

曲线如图 10 所示。从 FASM 曲线可以看出,三种不同速度下稳定裕量的变化趋势与仿真结果是一致的,在机器人行走的过程中稳定性呈现一定的周期性,在步态的半个周期内,稳定裕度呈现先增大后减小的变化趋势,重心垂直投影到达四个支撑足落足点所形成的凸多边形中心附近时,稳定性达到最佳。在支撑足发生切换时,会出现稳定裕度突变的现象,引起这种现象的主要原因归于“打滑”现象的存在使前后落足点的距离差不恒定。整个运动过程中稳定裕量的最大下降幅度为 25%,稳定性最差为发生步行足切换的时段,采用双四足步态运动过程中稳定裕度时刻大于 0,表明机器人一直处于稳定状态。

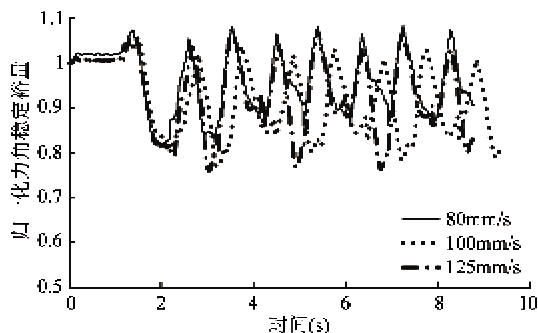


图 10 三种不同速度下归一化稳定裕量对比

三种等步长不同速度下的机器人稳定裕量的对比可以看出,机器人的步行速度对步态的稳定性是

有影响的,随着步行速度逐渐提高机器人的步态稳定性变差。

下面对出现的上述情况进行证明,由于机器人的步长 λ 是常数,而步行速度 v 增加,根据公式 $T = \frac{\lambda}{v}$ 可知相应的步态周期 T 会缩短,而步态周期由摆动相周期 $T_{transfer}$ 和支撑相周期 $T_{support}$ 构成,因此两个时间都会缩短,从而引起摆动腿速度增加。当摆动速度达到使系统动作的最大速度时,也就是 $T_{transfer}$ 维持为一个最大值时,由公式

$$v = \frac{\lambda}{T_{transfer}}(1 - \beta) \quad (24)$$

可知机器人的占地系数 β 必须减少以维持这个速度,相应的行走稳定性会变差。

6 结 论

本研究全面地考虑了各种干扰项对机器人稳定性的影响,建立了仿蟹机器人在复杂环境下稳定性的数学模型,提出了一种适用于足式机器人行进中 FASM 的计算方法,并利用该方法对仿蟹机器人双四足步态行走稳定性进行了仿真分析及原理样机实验,得到以下结论:(1)仿蟹机器人采用双四足步态行走时,稳定裕量变化呈现一定的周期性,其周期为双四足步态周期的一半,在步态的 0-1/4 周期内稳定裕量随时间的推移逐渐增大;在 1/4-1/2 周期内逐渐减小,质心点运动到落地足所形成的支撑凸多边形中心附近时其稳定性达到最佳;(2)整个运动过程中稳定性最差出现在步行足切换的阶段,考察机器人在行走过程中是否会出现倾翻的现象,只需检验该点稳定裕量是否大于 0;(3)等步长条件下,机器人的步行速度对步态稳定性有影响,随着速度的不断提高,步态稳定性变差。本研究仅关注机器人静态步态 ($\beta \geq 3/n$, n 为步行足个数)行走稳定性判定方法,该方法还不能应用于动态步态,本工作将继续深入开展对多足机器人动态步态行走稳定性以及失稳情况下姿态恢复方面的研究。

参考文献

- [1] 夏旭峰,葛文杰. 仿生机器人运动稳定性的研究进展. 机床与液压, 2007, 35(2): 229-234
- [2] 陈学东,孙翊,贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制. 武汉:华中科技大学出版社, 2006. 99-100
- [3] Kurazume R, Hirose S, Yoneda K. Feedforward and feedback dynamic trot gait control for a quadruped walk-

- ing vehicle. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. 3172-3180
- [4] Arikawa K, Hirose S. Development of quadruped walking robot "TITAN-VIII". In: Proceedings of the 1996 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robot and Systems, Osaka, Korea, 2001. 40-50
- [5] 王刚,张立勋,王立权. 仿蟹机器人交错等相位波形步态研究. 机器人, 2011, 33(1): 237-243
- [6] McGhee R B, Frank A A. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 1968, 3(3): 331-351
- [7] McGhee R B, Iswandhi G I. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(4): 176-182
- [8] Hirose S, Tsukagoshi H, Yoneda K. Normalized energy stability margin and its contour of walking vehicles on rough terrain. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001. 181-186
- [9] Papadopoulos E G, Rey D A. A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In: Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, 1996. 3111-3116
- [10] 王鹏飞,黄博,孙立宁. 四足仿生机器人稳定性判别方法. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(7): 1063-1066
- [11] Lin B S, Song S M. Dynamic modelling, stability and energy efficiency of a quadrupedal walking machine. In: Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, USA, 1993. 367-373
- [12] Yonedak K, Hirose S. Three-dimensional stability criterion of integrated locomotion and manipulation. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 1997, 9(4): 267-274
- [13] Kang D O, Lee Y J, Lee S H, et al. A study on an adaptive gait for a quadruped walking robot under external forces. In: Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, USA, 1993. 2777-2782
- [14] 李林. 多足仿生机器蟹结构设计及实验研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010. 13-27
- [15] Qiu Y Y, Duan B Y, Wei Q. Optimal distribution of the cable tensions and structural vibration control of the cabin-cable flexible structure. *Structural Engineering and Mechanics*, 2002, 14(1): 39-56
- [16] 李斌,刘金国,谈大龙. 可重构模块机器人倾翻稳定性研究. 机器人, 2005, 27(3): 241-246

A walking stability judging method for crab-like robots

Wang Liquan*, Wang Hailong*, Chen Xi**

(* College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(** College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

In order to exactly evaluate the walking stability and stability margin of a crab-like robot, a dynamic stability judging method suitable for multi-legged walking robots is proposed based on analyzing a variety of interference that makes a robot to tipover. The method uses the three-axis force sensor to measure the contact force between the foot of a robot and ground, and obtains the equivalent net tipping force relative to the centroid of the robot by using the D's Alembert's principle. Then, with the assistant experiment, the centroid fluctuation of the crab-like robot is acquired, and the vertical line vector of tipover axis is obtained by solving the space vector equation. Finally, the mathematical model of force-angle stability margin (FASM) is built by integrating the net tipping force with the vertical line vector of tipover axis, and the stability is determined based on the value of the normalized FASM. The simulation and experimental results show that the method can exactly judge the stability of crab-like robots and dynamically display the change of stability margin.

Key words: crab-like robot, tipover stability, stability pyramid, force-angle stability margin (FASM)