

文章编号: 1001-0920(2006)06-0619-06

拟人机器人抗干扰行走稳定性分析

殷晨波^a, 周庆敏^b, 徐海涵^a, 杨敏^a

(南京工业大学 a 机械与动力工程学院, b 信息科学与工程学院, 南京 210009)

摘要: 通过引入虚拟零力矩点假设, 提出了一个多种外界干扰下拟人机器人的整体分析模型, 分析了拟人机器人抗干扰行走的稳定性, 给出了支撑多边形的计算机表达方法和失稳时旋转边界的确定方法。为了在不同的情况下保持平衡, 提出了改变支撑多边形、手的支撑、改变上体重心等3种新的稳定性恢复方法。通过优化从虚拟零力矩点到旋转边界的距离, 提出了恢复平衡的优化算法。通过仿真实例验证了所提出方法的正确可行性。

关键词: 拟人机器人; 稳定性维护; 步态规划; ZMP

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Stability Maintenance of a Humanoid Robot under External Disturbance

YIN Chen-bo, ZHOU Qing-min, XU Hai-han, YANG Min

(a School of Mechanical and Power Engineering, b School of Information Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China. Correspondent: YIN Chen-bo, E-mail: yinchenbo@njut.edu.cn)

Abstract: By introducing a concept of fictitious zero moment point, a model of stability analysis of a humanoid robot is given, in which different environments such as external disturbance are considered. A method to maintain the whole body stability of robot under disturbance is presented. The support polygon and the rotation edge in the case of losing balance are determined by simulation. In order to maintain stability in different environments, a new control strategy is presented including the adjustment of the support polygon, the push or pull support of hand with environment, and the additional movement of upper robot body. An optimization algorithm of stability maintenance is proposed by optimization of the distance between the fictitious zero moment point and the rotation edge. The feasibility of the proposed method is demonstrated through simulation.

Key words: Humanoid robot; Stability maintenance; Gait planning; ZMP

1 引言

双足行走拟人机器人是近年来机器人研究领域的研究热点, 在这方面有许多正在进行的课题^[1-3]。拟人机器人的行走是复杂的动力学反问题, 研究重点主要在模型建立、动力学仿真和步态规划等。关于双足行走机器人行走稳定性的模型大都运用了零力矩点(ZMP)规则和其他的不同方法^[4-6]。

Vukobratovic^[7,8]首次提出了零力矩点的概念, Yoneda^[9]等人提出一种称为“跌倒稳定判断标准”的评判准则, 并用于机器人的运动控制。

Go swami^[10]提出了足部旋转指示(FRD), Harada^[11]研究了拟人机器人与物体之间的互相作用, 而有研究指出拟人机器人的转矩角的改变对于保持机器人的行走稳定性起着至关重要的作用^[12]。但是, 较少研究考虑到外部环境对机器人保持稳定性的影响。

失稳对机器人来说可能会导致不可预料的灾难性后果, 有必要确保机器人在受到外界干扰时每一个瞬间的稳定性。为此, 需要估计和量化有失稳危险的范围。足部的转动平衡对于评价和控制拟人机器人步态和姿势的稳定性来说是重要的评判标准。本

收稿日期: 2005-04-18; 修回日期: 2005-08-25

作者简介: 殷晨波(1963—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士, 从事机电一体化、机器人等研究; 周庆敏(1963—), 女, 河北唐山人, 教授, 从事计算机智能、机器人等研究。

文通过引入虚拟零力矩点 (FZMP) 的概念来研究当拟人机器人受到外界干扰时保持行走稳定性的方法

2 零力矩点和虚拟零力矩点

2.1 ZMP 和稳定行走

当拟人机器人行走时, 其机器人机构运动的基本要求是保持与地面接触的动态平衡。拟人机器人依赖于足部与地面支撑产生的摩擦反力和竖直反力来实现支撑。所以足部不能直接控制, 但可通过足部以上适当的动力学机构运动来实现间接控制。因此整个机器人机构的行为可以指示为一点, 在这一点上所有力对机构的作用能用一个合力来代替, 这个点被称之为 ZMP。

1) 单足支撑时, 如果 ZMP 位于支撑足的脚步内; 或在双足支撑时, 如果 ZMP 位于支撑多边形以内, 那么双足机器人能够保持动态平衡并且可能稳定行走。

2) 单足支撑时, 如果 ZMP 位于脚印边界; 或双足支撑时, 如果 ZMP 位于支撑多边形的边缘, 那么机器人将会摔倒或者有摔倒的倾向。

3) 如果计算的 ZMP 位于单脚支撑的脚印之外, 或双脚支撑的支撑多边形之外, 那么机器人将因不能保持动态平衡而摔倒。

2.2 FZMP 和抗干扰稳定性

为了分析行走稳定性, 必须考虑地面反作用力点和支撑多边形之间的关系。如果计算所得的地面反作用力点的位置位于支撑多边形内, 那么机器人处于动态平衡。计算确定的地面反作用力点就是 ZMP 点, 如果只有一只脚着地, ZMP 点的作用力就是实际的反力; 如果是双足着地, 反力是所有接触压力之和。如果计算所得的 P 点位于支撑多边形以外, 称之为 FZMP 点。这种情况下, 拟人机器人将有可能绕边界旋转并失去平衡。

已有文献提到运用 FZMP 来解决稳定性控制和维持的重要性^[12]。但是怎样充分利用它的特性仍有待进一步研究。本文将 FZMP 有效地用于解决拟人机器人在受到外界干扰时的稳定性的保持和控制。

3 拟人机器人抗干扰稳定性

3.1 考虑外界干扰的稳定性分析模型

拟人机器人模型如图 1 所示。其中: 坐标系 O 定义在双足机器人行走的地平面上; p_{fr} 和 p_{fl} 表示接触点的位置矢量方向; m_i 和 I_i 分别表示质量和链接 i 的转动惯量; p_G 和 p_{G_i} 表示重心的重力和第 i 个链杆的重力, $p_G = \sum_{i=1}^n m_i p_{G_i} / \sum_{i=1}^n m_i$; R 和 U 表示地面在 ZMP 的反力和力矩, R 和 U 表示 FZMP 的反力和

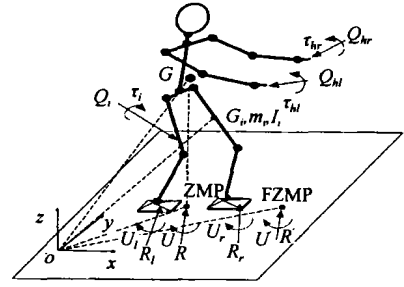


图 1 拟人机器人模型

力矩; $Q_l, Q_r, \tau_{hl}, \tau_{hr}$ 分别为机器人的手部作用力和力矩; p_{hl} 和 p_{hr} 为左右手的位置矢量。

另外, 假设机器人受到期望和非期望的作用力 $Q_i (i = 1, \dots, m)$ 和力矩 $\tau_i (i = 1, \dots, p)$, 作用在机器人身体的不同部位点 p_{Q_i} , 并假设

$$T = \sum_{i=1}^p \tau_i, \quad \tau_h = \tau_{hl} + \tau_{hr}, \quad M = \sum_{i=1}^n m_i,$$

那么计算零力矩点瞬间 u_c 可表示为

$$u_c = \dot{H}_G - \tau_h - (p_{hl} - p_c) \times \sum_{i=1}^m Q_i - (p_{hr} - p_c) \times \sum_{i=1}^m (p_i - p_c) \times Q_i + M (p_G - p_c) \times (p_G - g). \quad (1)$$

其中 H_G 和 H_{G_i} 是整个身体质心和第 i 个链杆的瞬时转动力矩, 有

$$H_G = \sum_{i=1}^n H_{G_i} + \sum_{i=1}^n (p_{G_i} - p_G) \times m_i \dot{p}_{G_i} \quad (2)$$

取 $u_{cx} = 0, u_{cy} = 0$, 并带入式 (1), 可得到计算所得的 ZMP 位置矢量的投影, 即

$$x_c = \frac{\dot{H}_{G_x} + M x_G (\dot{z}_G + g) - M z_G \dot{x}_G}{\sum_{i=1}^m Q_{iz} + Q_{lx} + Q_{rx} + M (\dot{z}_G + g) + \tau_y + \tau_{hy} + \sum_{i=1}^m (x_Q Q_{iz} - z_Q Q_{ix}) + \sum_{i=1}^m Q_{iz} + Q_{lx} + \frac{x_Q Q_{lx} - z_Q Q_{lx} + x_Q Q_{rx} - z_Q Q_{rx}}{Q_{rz} + M (\dot{z}_G + g)}},$$

$$y_c = \frac{\dot{H}_{G_y} + M y_G (\dot{z}_G + g) - M z_G \dot{y}_G}{\sum_{i=1}^m Q_{iy} + Q_{ly} + Q_{ry} + M (\dot{z}_G + g) + \tau_x + \tau_{hx} + \sum_{i=1}^m (y_Q Q_{iz} - z_Q Q_{iy}) + \sum_{i=1}^m Q_{iy} + Q_{ly} + \frac{y_Q Q_{ly} - z_Q Q_{ly} + y_Q Q_{ry} - z_Q Q_{ry}}{Q_{rz} + M (\dot{z}_G + g)}}. \quad (3)$$

如果手部没有作用力, 那么计算零力矩点 $p_c =$

$(x_c \ y_c \ 0)^T$, 由式(3) 可得

$$x_c = \frac{\dot{H}_{G_y} + M \dot{x}_G(z_G + g) - M(z_G - z_c)\dot{x}_G}{\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M(z_G + g)} - \frac{\tau_y + u_{hy} + \sum_{i=1}^m (x_{Qi}Q_{iz} - z_{Qi}Q_{ix})}{\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M(z_G + g)}$$

$$y_c = \frac{\dot{H}_{G_x} + M \dot{y}_G(z_G + g) - M(z_G - z_c)\dot{y}_G}{\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M(z_G + g)} - \frac{\tau_x + u_{hx} + \sum_{i=1}^m (y_{Qi}Q_{iz} - z_{Qi}Q_{iy})}{\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M(z_G + g)} \quad (4)$$

3.2 支撑多边形的确定

如果是单脚着地的情况, 上述的支撑多边形就是脚印般大的区域。但是如果双脚着地, 支撑多边形就较复杂。目前支撑多边形一般用图表形式简化表示, 这给稳定性分析和控制带来许多不便。本文提出一种自动判断支撑多边形的算法: 假设脚的形状是个矩形, 那么两只脚共包括 8 个边, 定义组成支撑多边形的所有边为有效连接边, 候选的有效连接边是所有连接两只脚的 8 个角的连线。设左脚的顶角点分别用 p_1, p_3, p_5, p_7 来表示, 右脚用 p_2, p_4, p_6, p_8 表示, 则通过两个点 P_i 和 P_j 的连线 L_{ij} 可表示为

$$y = a_{ij}x + b_{ij}, \quad (5)$$

$$a_{ij} = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}, \quad b_{ij} = \frac{x_i y_i - x_j y_j}{x_j - x_i}$$

如果 8 个顶点在连线 L_{ij} 的同一侧, 满足式(6), 那么对应于 L_{ij} 的边界 E_{ij} 是有效连接边; 否则 E_{ij} 不是有效边界, 应该忽略。这里的 P_s 和 P_t 分别为 8 个顶点中的一个:

$$\begin{cases} y_s - y_t > 0 \\ y_t - y_s > 0 \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} y_s - y_t < 0 \\ y_t - y_s < 0 \end{cases}$$

$$s, t = 1, \dots, 8, \quad s \neq t \quad (6)$$

其中 p_s 和 p_t 是 p_s 和 p_t 在 L_{ij} , $y_s(y_s = a_{ij}x_s + b_{ij})$, $y_t(y_t = a_{ij}x_t + b_{ij})$ 上的投影

3.3 FZMP 和支撑多边形之间的关系

当机器人失稳时, 确定在所有的有效连接边中哪一条是旋转边界, 并以此计算出 FZMP 到旋转边界的距离。FZMP 到 E_{ij} 的距离如下:

$$S = \min_{i,j=np} p_{fzmp} - p_{in} \quad (7)$$

其中: p_{ij} 是 FZMP 到 E_{ij} 的垂足的位置矢量

$$x_{p_{ij}} = \frac{a_{ij}b_{ij} - a_{ij}y_{fzmp} + x_{fzmp}}{1 - a_{ij}^2}$$

$$y_{p_{ij}} = \frac{b_{ij} - a_{ij}y_{fzmp} + a_{ij}x_{fzmp}}{1 - a_{ij}^2} \quad (8)$$

满足式(7) 的垂足的位置矢量表示为 p_o 点, 有

$$s = p_{fzmp} - p_o \quad (9)$$

根据 FZMP 的位置, 可以由式(7) 确定旋转边界, 再由式(9) 得到 FZMP 到旋转边界的距离以及失稳的方向

4 抗干扰稳定性控制策略

当拟人机器人受到外力干扰而失稳时, 控制系统必须立即作出反应, 以保持机器人的行走稳定性

4.1 扩大支撑多边形

通过调整摆动脚着地的位置来改变支撑多边形, 从而达到让机器人在受到外力干扰情况下保持稳定。已有文献对此进行阐述, 但并没有说明如何实现扩大支撑多边形。同时移动平行的旋转边界是不现实的, 这意味着两只脚要同时移动。如图 2 所示, 在没有外力干扰的情况下移动脚应该落在实线表示的位置上, 但受到外力干扰时, 机器人会绕着旋转边旋转, 而此时应改变脚的着地位置以保持稳定性。脚的移动方向改变角 α^* 可由下式:

$$\alpha^* = \cos^{-1} \frac{e \cdot s}{e \cdot s} \quad (10)$$

确定。其中 e 为法平面的单位矢量

脚相对于原着地位置所移动的距离 l_f^* 由下式:

$$l_f^* = \sin(\alpha^* - \beta) [l \cos(\gamma - \alpha^* - \beta) - b] + l \sin(\gamma - \alpha^* - \beta) + a \quad (11)$$

确定。如果因为脚部的额外移动所造成的重心改变量较小的话, 那么机器人落脚于新的落脚点时将是基本稳定的

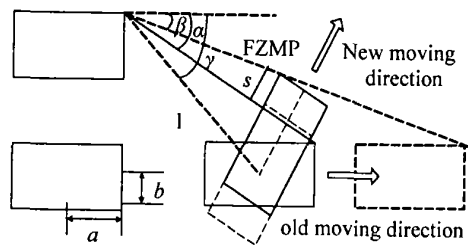


图 2 机器人落脚位置的确定

4.2 改变上半身的姿势

假设上半身各个链杆的位移、速度和加速度分别相等, 分别表示为 s_u, v_u, a_u , 运动的方向指向 FZMP。也就是说, $x_j = s_u \cos \alpha_j^*, y_j = s_u \sin \alpha_j^*, \dot{x}_j = v_u \cos \alpha_j^*, \dot{y}_j = v_u \sin \alpha_j^*, \ddot{x}_j = a_u \cos \alpha_j^*, \ddot{y}_j = a_u \sin \alpha_j^*$ 。假设上身第 j 个链杆处的 $z_j = \text{const}, \dot{z}_j = 0$ 。此时式(3) 可以转换为

$$\ddot{x}_{zmp} \left[\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M(z_G + g) \right] =$$

$$\begin{aligned} & \dot{\Delta H}_{G_y} + (M x_G + M_{u_s} \cos \alpha_f^*) (z_G + g) - \\ & z_G (M x_G + M_{u_s} \cos \alpha_f^*) - \tau_y - \\ & \sum_{i=1}^m (x_Q Q_{iz} - z_Q Q_{ix}), \\ & \overline{y}_{\text{zmp}} \left[\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M (z_G + g) \right] = \\ & \dot{\Delta H}_{G_x} + (M y_G + M_{u_s} \cos \alpha_f^*) (z_G + g) - \\ & z_G (M y_G + M_{u_s} \cos \alpha_f^*) - \tau_x - \\ & \sum_{i=1}^m (y_Q Q_{iz} - z_Q Q_{iy}), \\ & \Delta H_{G_y} = \sum_{i=1}^{n_1} \left[-\frac{M_u}{M} s_u \cos \alpha_f^* m_i z_{G_i} \right] + \\ & \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \left[\frac{M - M_u}{M} s_u m_i \cos \alpha_f^* z_{G_i} \right], \\ & \Delta H_{G_x} = \sum_{i=1}^{n_1} \left[-\frac{M_u}{M} s_u \sin \alpha_f^* m_i z_{G_i} \right] + \\ & \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \left[\frac{M - M_u}{M} s_u m_i \sin \alpha_f^* z_{G_i} \right]. \end{aligned}$$

其中: M_u 是整个上半身的质量, $\overline{x}_{\text{zmp}}$ 和 $\overline{y}_{\text{zmp}}$ 是预先设计的 ZMP 在 x 和 y 方向上的投影, s_u^* 和 a_u^* 可由式(12) 计算得到

4.3 机器人手接触周围物体

通过手接触周围物体, 附加的支撑确保恢复平衡. 在支撑反力的作用下, 计算所得到的零力矩点位置改变量由下式:

$$\begin{aligned} x_c - x_c &= \\ \frac{u_{hy} + x_Q Q_{lx} - z_Q Q_{lx} + x_Q Q_{rx} - z_Q Q_{rx}}{m} & \\ \frac{Q_{iz} + Q_{iz} + Q_{rz} + M (z_G + g)}{i=1} & \\ y_c - y_c &= \\ \frac{u_{hx} + x_Q Q_{ly} - z_Q Q_{ly} + x_Q Q_{ry} - z_Q Q_{ry}}{m} & \\ \frac{Q_{iz} + Q_{iz} + Q_{rz} + M (z_G + g)}{i=1} & \end{aligned} \quad (13)$$

确定. 这里假设 $x_l = x_r = x_a, y_l = y_r = y_a, z_l = z_r = z_a, Q_{lx} = Q_{rx} = Q_x^*/2, Q_{ly} = Q_{ry} = Q_y^*/2, Q_{lz} = Q_{rz} = Q_z^*/2, Q_{lx} = Q_{ly} = Q_{lz} = 0, \Delta x_{ch} = x_c - x_c, \Delta y_{ch} = y_c - y_c$, 可以得到

$$\begin{aligned} Q_x^* &= \frac{(\Delta y_{ch} - x_a) x_a}{(\Delta y_{ch} - x_a) z_a} \left[\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M (z_G + g) \right], \\ Q_z^* &= \frac{\Delta y_{ch}}{\Delta y_{ch} - x_a} \left[\sum_{i=1}^m Q_{iz} + M (z_G + g) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

手与周围的物体的作用可以是推也可以是拉, 所以 Q_x^* 和 Q_z^* 的值可以是正的也可以是负的

4.4 优化控制策略

上述 3 种方法都可以单独运用于机器人稳定性的维持, 但在有些情况下因为时间或者步幅的限制,

只用某一种方法会难以实现平衡维持. 所以, 为了保持机器人的平衡稳定就必须综合几种维持平衡的方法. 这时机器人稳定性的维持可以看作如下的动态最优化问题:

目标函数

$$\begin{aligned} F(X) &= \\ \min_{X, K^m} (\lambda \max_t (p_c(X) - p_{\text{amp}}^*(k_f X_f) \quad p_c = p_{\text{amp}}) & \\ \gamma \max_t (p_c(X) - p_o(X) \quad p_c = p_{\text{famp}})), & \end{aligned} \quad (15)$$

约束函数

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{H_{G_x} + (M x_G + M_{u_s} \cos \alpha_f^*) (z_G + g)}{m} \\ & \frac{Q_{iz} + k_a Q_z + M (z_G + g)}{i=1} \\ & \frac{(M x_G + M_{u_s} \cos \alpha_f^*) z_G}{m} \\ & \frac{Q_{iz} + k_a Q_z + M (z_G + g)}{i=1} \\ & \frac{\tau_y + \sum_{i=1}^m (x_Q Q_{iz} - z_Q Q_{ix}) + k_a (x_a Q_z - z_a Q_x)}{m} \\ & \frac{Q_{iz} + k_a Q_z + M (z_G + g)}{i=1}, \\ y_c &= \frac{H_{G_y} + (M y_G + M_{u_s} \sin \alpha_f^*) (z_G + g)}{m} \\ & \frac{Q_{iz} + k_a Q_z + M (z_G + g)}{i=1} \\ & \frac{(M y_G + M_{u_s} \sin \alpha_f^*) z_G}{m} \\ & \frac{Q_{iz} + k_a Q_z + M (z_G + g)}{i=1} \\ & \frac{\tau_x + \sum_{i=1}^m (y_Q Q_{iz} - z_Q Q_{iy}) + k_a y_a Q_z}{m} \\ & \frac{Q_{iz} + k_a Q_z + M (z_G + g)}{i=1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{G_0} &= \\ H_{G_i} &+ \sum_{i=1}^{n_1} \left[p_{G_i} - p_G - \frac{M_u}{M} k_u s_u I_u \right] \times \\ m_i p_{G_i} &+ \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \left[p_{G_i} - p_G + \frac{M - M_u}{M} k_u s_u I_u \right] \times \\ m_i (p_{G_i} + k_u v_u) &= \\ H_{G_0} &+ \sum_{i=1}^{n_1} \left[-\frac{M_u}{M} k_u s_u I_u \right] \times \\ m_i p_{G_i} &+ \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \left[\frac{M - M_u}{M} k_u s_u I_u \right] \times \\ m_i (p_{G_i} + k_u v_u) &+ \\ & \sum_{i=n_1+1}^{n_2} (p_{G_i} - p_G) \times m_i (k_u v_u), \end{aligned}$$

$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, p_o(X)$ 由式(7) 确定

其中: $X = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7)^T = (X_f, X_u, X_a)^T, p_c(X) = (x_c \ y_c \ 0)^T$ 是优化设计变量, $x_f = (l_f, \alpha_f)^T$ 是脚运动矢量, l_f 和 α_f 分别是脚相对

于落脚平面位置的距离和方向, $X_u = (s_u \ v_u \ a_u)^T$ 是上半身运动的参数向量, $X_a = (Q_x, Q_z)^T$ 是手部支撑作用力向量, y 方向的力忽略不计. λ 和 γ 是取值不同的加权系数, λ 应选相对较小的值, 根据优化的要求来设置, γ 的值表示 FZMP 位置对目标函数影响的程度, 如果算出的 p_c 值在支撑多边形以内, 则 $\gamma = 0$; 如果 p_c 在支撑多边形以外, 则 γ 应取较大的值作为惩罚 $k = (k_u \ k_f \ k_a)$ 是系数向量, k_u, k_f, k_a 取值为 0 或 1. 例如, $k = (1, 1, 0)$ 表示考虑了上身和脚部的额外运动而手部没有和周围物体接触

5 仿真实例

根据上文所述方法, 运用动力学分析软件 ADAM S 构建拟人机器人的仿真模型. 拟人机器人的高 1650 mm, 步行速度为 2 km/h, 步幅为 520 mm. 部分仿真参数如表 1 所示

完成拟人机器人的建模之后, 分别考虑了上身运动、扩大步幅以及两者相结合的几种仿真. 在仿真过程中, 模拟脚与地面的接触模拟是至关重要的

图3和图4所示为机器人重心在正常行走时和表1 仿真参数

部件	长度/m	质量/kg
腿部	0.35	5.0
胫	0.35	3.0
踝关节	0.10	0.5
大臂	0.307	0.56
小臂	0.241	0.58
手	0.178	20.0
脚跟/脚趾	0.10/0.12	0.8

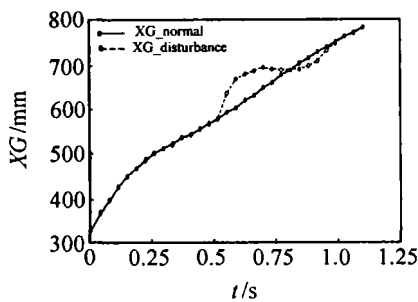


图3 重心的 x 轴坐标

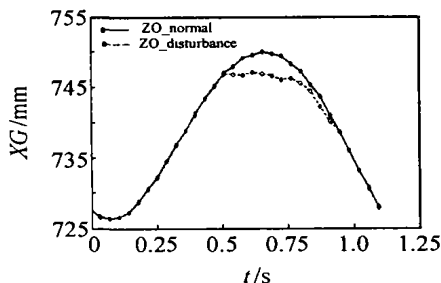


图4 重心的 z 轴坐标

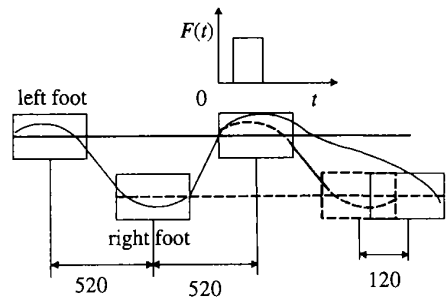


图5 步幅调整(不改变方向)

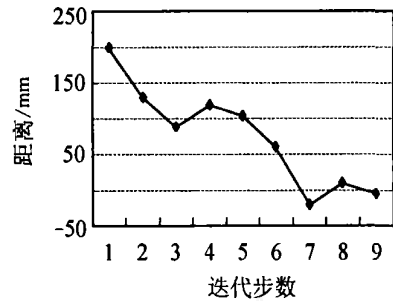


图6 FZMP 和支撑多边形中心之间的距离. 在受到外力作用下为保持平衡上身额外移动的 x 轴和 z 轴坐标

在机器人受到外力作用下, 稳态行走也可以通过改变步幅来保持. 图5所示的步幅相比正常的步幅扩大了 120 mm, 而行走的方向并没有改变, 这种方式的优化过程如图6所示. 仿真表明, 拟人机器人受到外力干扰时, 可通过上述的控制策略保持稳定行走.

6 结 语

机器人抗干扰稳定性分析是拟人机器人研究中的重要课题之一. 本文提出了一种通过有效地对预先设计的运动轨迹调整来实现机器人稳定行走的方法, 指出 FZMP 点对于保持机器人的行走稳定性是至关重要的. 根据 FZMP 点的位置可以自动地确定旋转边界, 而 FZMP 的位置以及距旋转边界的距离表示失稳的强度和方向. 文中讨论了维持稳定的方法, 即扩大支撑多边形, 改变上半身的姿势和机器人手接触周围物体. 同时, 给出了在不同情况下稳定性的优化控制方法. 数字化仿真表明, 本文提出的方法是正确可行的.

参考文献 (References)

[1] Kaneko K, Kajita S, Kanehiro F, et al. Design of Advanced Leg Module for Humanoid Robotics Project of MET I[A]. *Proc of the 2000 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. San Francisco, 2000: 3996-4001.

[2] Okada K, Ogura T, Haneda A, et al. Integrated System Software for HRP2 Humanoid[A]. *Proc of the*

- 2004 *IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. New Orleans, 2004: 3207-3212
- [3] Pfeiffer F, Loeffler K, Gienger M. The Concept of Jogging JOHNNIE [A]. *Proc of the 2002 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. Washington DC, 2002: 3129-3135
- [4] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Moment Point [A]. *Proc of the 2003 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. Taipei, 2003: 1620-1626
- [5] Stojic R, Chevallereau C. On the Stability of Biped with Point Foot-ground Contact [A]. *Proc of the 2000 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. San Francisco, 2000: 3340-3345
- [6] Kim J H, Oh J H. Walking Control of the Humanoid Platform KHR-1 Based on Torque Feedback Control [A]. *Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. New Orleans, 2004: 623-626
- [7] Vukobratovic M. *Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1990
- [8] Vukobratovic M, Borovac B. Zero-Moment Point - Thirty Five Years of Its Life [J]. *Int J of Humanoid Robotics*, 2004, 1 (1): 157-173
- [9] Yoneda K, Hirose S. Tumble Stability Criterion of Integrated Locomotion and Manipulation [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Intelligent Robot and Systems* [C]. Osaka, 1996: 870-876
- [10] Gowami A. Postural Stability of Biped Robots and the Foot-rotation Indicator (FRI) Point [J]. *The Int J of Robotics Research*, 1999, 18 (6): 523-533
- [11] K Harada, S Kajita, K Kaneko, et al. Pushing Manipulation by Humanoid considering Two-kinds of ZMPs [A]. *Proc of the 2003 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. Taipei, 2003: 1627-1632
- [12] A Goswami, V Kallen. Rate of Changes of Angular Momentum and Balance Maintenance of Biped Robots [A]. *Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. New Orleans, 2004: 3785-3790

(上接第618页)

参考文献(References)

- [1] Tanagi T, Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, 15(2): 116-132
- [2] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Robust Stabilization of a Class of Uncertain Nonlinear Systems via Fuzzy Control: Quadratic Stability, H_∞ Control Theory and Linear Matrix Inequalities [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 1-13
- [3] Ma X J, Sun Z Q, He Y Y. Analysis and Design of Fuzzy Controller and Observer [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1998, 6(1): 41-51
- [4] Lee H J, Park J B, Chen G R. Robust Fuzzy Control of Nonlinear Systems with Parametric Uncertainties [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(2): 369-379
- [5] Tong S C, Li H X. Observer-Based Robust Fuzzy Control of Nonlinear Systems with Parametric Uncertainties [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 131 (2): 165-184
- [6] Tong S C, Li H X, Wang T. Fuzzy Robust Tracking Control for Uncertain Nonlinear Systems [J]. *Int J of Approximate Reasoning*, 2002, 30(6): 73-90
- [7] Wang W J, Leh Luoch. Stability and Stabilization of Fuzzy Large-scale Systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(3): 309-315
- [8] 张友刚, 向静, 肖建. 离散模糊大系统的分散化PDC控制器设计: LM1方法 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(3): 351-354
(Zhang Y G, Xiang J, Xiao J. Design of Decentralized PDC Controllers for Discrete-time Fuzzy Large-scale System: An LM1 method [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(3): 351-354)
- [9] Tseng C S, Chen B S. Decentralized Fuzzy Model Reference Tracking Control Design for Nonlinear Interconnected Systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(6): 795-809
- [10] Feng H siag H siao, Jiang J D. Stability Analysis of the Fuzzy Large-scale Systems [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 2001, 32(1): 122-126