

一种类人型机器人的步行稳定性研究

沈继红¹, 丁二华²

(1. 哈尔滨工程大学 理学院 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要 类人型机器人行走稳定性的理论对机器人模仿人的行走有着至关重要的影响。通过增加类人型机器人的脚跟,使其行走稳定性增强。根据双足机器人行走稳定性的动力学条件,结合类人型机器人行走的特征和重心位置,并考虑地面反力和能量两方面的因素,给出了类人型机器人行走稳定性与脚跟高度的数学关系,即增加机器人的脚跟可以增强类人型机器人步行的稳定性。

关键词 类人型机器人;步行;脚跟高度;地面反力

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1006-704X(2004)04-0536-04

Walking stability of a type of subhuman robot

SHEN Ji-hong, DING Er-hua

(1. School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. School of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract The walking stability of so-called subhuman robots will have an important influence on robots ever walking like humans. Research was done after increasing the normal heel height of a robot to make walking more stable. Considering the re-force against ground and energy, the previous stability condition was studied with the walking characteristics and center of gravity of a subhuman robot. The study implies that the walking stability of subhuman robots is closely related to heel height, and increasing heel height may improve the walking stability of subhuman robots.

Key words subhuman robot; walking stability; heel height; re-force against ground

目前,类人型机器人的研究是机器人研究中一个活跃而又重要的分支。其研究涉及仿生学、机械工程、人体动力学和控制科学等多门学科。在实际应用中,类人型机器人可用于放射性、危险和其它对人体有害环境中取代人类劳动。类人型机器人最大的特点便是步行,而步行的稳定性则是至关重要的。在步行过程中,摆动腿落地时对地面产生冲击,造成关节的剧烈振动,影响了机器人行走的稳定性。要提高机器人的步行速度,就必须设法减少冲击振动,有学者提出在脚底加软垫来减少冲击,这里则从地面反力和能量的角度研究合适的脚跟高度对类人型机器人的稳定性影响。

1 动态步行姿态稳定性的动力学条件

假设机器人的支撑面与空间参考系的平面重合,坐标原点为支撑原点,由 D' Menber 定理,将机器人行走时所受的全部作用力和力矩向参考系原点转化,得到 x, y, z 方向的力为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = - \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a + g \end{bmatrix},$$

则 x, y, z 绕轴的力矩为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n m_i \begin{bmatrix} (\ddot{z}_{ci} + g)y_{ci} - \ddot{y}_{ci}z_{ci} \\ \ddot{x}z_{ci} - (\ddot{z}_{ci} + g)x_{ci} \\ \ddot{y}x_{ci} - \ddot{x}_{ci}y_{ci} \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{bmatrix}.$$

将合力从参考系原点移到 $o-xy$ 平面的点 $P(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$,使机器人绕 x 轴和 y 轴的倾覆力矩为 0,则可以得到

$$\begin{cases} x_{zmp} = -\frac{M_y}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(z_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i x_i z_i - \sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i(z_i + g)}, \\ y_{zmp} = -\frac{M_x}{F_z} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(z_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i x_i z_i - \sum_{i=1}^n m_i x}{\sum_{i=1}^n m_i(z_i + g)}, \\ z_{zmp} = 0. \end{cases}$$

因此,要使机器人在行走过程中保持稳定,就必须满足下面的条件:

1)地面反力

$$F_{gz} = -F \geq 0, \text{ 即 } \sum_{i=1}^n m_i(\ddot{z}_i + g) \geq 0;$$

2)零力矩点 $P(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ 始终在支撑平面内,即 $-\frac{1}{2} < x_{zmp} < \frac{1}{2}, -\frac{d}{2} < y_{zmp} < \frac{d}{2}$,

这样,机器人就不会绕 x 、 y 轴倾覆, l 、 d 分别为支撑域的长和宽;

3)为了不产生滑动现象,包括沿摩擦力方向滑动和绕 z 轴滑转,必须满足

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu |F_z|,$$

$$|M_x| \leq R(\mu |F_z| - \sqrt{F_x^2 + F_y^2}).$$

式中: μ 为脚底与地面的摩擦系数; R 为当量摩擦

$$圆半径, R = \sqrt{\left(\frac{1}{2} - x_{zmp}\right)^2 + \left(\frac{d}{2} - y_{zmp}\right)^2}.$$

2 调整后重心的移动

一般,平底双足机器人的重心分布在两脚组成的竖直平面内,这样容易向后倾倒,需用机械的方法使之重心前移,位于脚掌支撑范围内,而给机器人的双足加上脚跟后,必然可以使它的重心发生向上和向前的微小移动,重心抬高则会增加不平稳度,而重心前移又会增加平稳度,假设所加后跟高度为 h ,脚长为 l ,则

$$\text{重心前移: } \Delta l = (l_r + \Delta h) \sin \theta;$$

$$\text{重心上移: } \Delta h = \frac{l \sin \theta - l_r(1 - \cos \theta)}{2 - \cos \theta}.$$

式中: l_r 为原先机器人重心的高度; θ 为脚掌对支撑平面的倾斜角。

由人体结构学分析知,当脚跟与脚掌受力之比为 3:2 时,机器人在前后方向上具有最大的稳定性,而且机器人此时是平衡的,如图 1 所示,得到

$$F_A \cdot d_1 = F_D \cdot d_2, \quad d_1 + d_2 = 0.7l$$

式中: $d_1 = 0.27l, d_2 = 0.28l$ 。

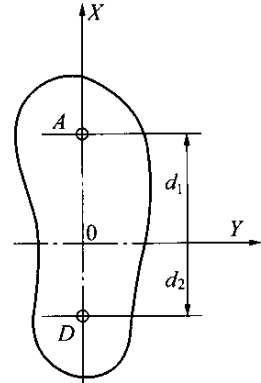


图 1 重心前移时的受力分析

Fig. 1 Force analysis when barycenter moves ahead

由分析知,对于机器人来说, d_2 便是机器人重心前移的距离 Δl ,这样当 $\Delta l = d_2 = 0.25l$ 时,就可以求得相应的临界角 θ^* ,实际上,机器人重心前移的距离要远小于 d_2 。

很显然, θ 角的范围是 $(0, \pi/2)$,在此区间内前后方向的稳定度先增加后减小,而竖直方向的稳定度一直在减小,故构造调整后的稳定度函数:

$$y = k_1 \cos(\theta - \theta^*) - k_2 \theta$$

式中: k_1 、 k_2 分别为前后方向的移动对稳定性的影响系数。

3 调整后的稳定性分析

所谓稳定的步行姿态是指即使加上外界干扰仍能恢复到原先的理想步行姿态的步行姿态。

3.1 基于地面反力的稳定性分析

机器人在行走的过程中由于要进行脚部运动,这样重心必然会发生变化,而脚跟增加的高度对行走过程中重心变化的影响可以忽略,此时完全可以将 θ 看作初始时刻的干扰,只要此干扰能够使机器人运动在相应的稳定裕度内,那么,此时步态仍然是稳定的。

为了分析得简单,在分析时采用简化的两足步行模型,在干扰时假定平均行进的速度恒定、步行长

度恒定、相位恒定、支撑率(足着地时间对步行周期的比值)恒定、步行周期恒定,此时研究脚的运动。这里考虑特殊的情况,即仅有一只脚着地的姿态,分析时认为只有地面反力作用在脚上,而脚对地面没有相对滑动。当单脚支撑时,分析脚部受力情况,如图 2 所示。

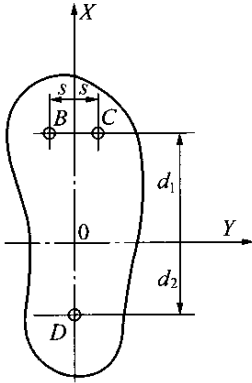


图 2 单脚支撑时受力分析

Fig. 2 Force analysis when one foot stands

地面反力矢量为 $F = [F_x, F_y, F_z]^T$, 绕 3 根轴线的动态力矩为 $M = [M_x, M_y, M_z]^T$, 对于分 F_x, F_y 量产生绕 z 轴的力矩, 当摩擦力足够大时, 这些分量便不成问题, 关键是分量 F_z 绕 x, y 轴的力矩问题, 对于 x 轴方向需要研究躯体姿态控制, 而对于 y 轴方向, 只需调整支撑脚即可。

由图 2 的方法测定地面反力的垂直分量, 有式 (1) 成立, 即

$$\begin{cases} s(F_{Bz} - F_{Cz}) = M_x, \\ d_2 F_{Az} - d_1(F_{Bz} + F_{Cz}) = M_y. \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{Az}, F_{Bz}, F_{Cz} 分别是在点 A、B、C 所测得的地面反力的垂直分量。

干扰量可认为是分别作用在前后、左右方向上的外界干扰, 对于前后方向, 所加干扰使得 M_y 变大, 即启动力矩较大, 只要适当的控制机器人的步行速度与步行周期, 就可以在几步内使步行趋于稳定, 只是初始速度变大和步行周期变长。对于左右方向的初始干扰, 需要研究躯体的轨迹, 所加干扰会使躯体在横向发生倾斜, 但倾斜的方向为提脚的一侧, 只要控制步行的长度和变换支撑脚便可以使行走稳定下来。根据格比纳(Gubina)等人的研究结果, 当倾斜 1 rad 时, 在前进 2 步以后, 躯体就变成直立状态, 而 12 步以后外界的干扰几乎完全被消除, 但步行周期变短了, 这说明这样增加了步频, 在干扰消除后, 有利于步行的稳定性。

为了更好地分析调整后的稳定性, 下面对双脚支撑的情况作分析。

这里干扰量仍然假设为 θ , 对于 $\theta - \dot{\theta}$ 平面便可以求得相应的稳定区间, 即稳定裕度的范围, 只要运动在此范围内, 通过补偿和控制就可以使姿态稳定。

如图 3, 以等效的 z_{mp} 点为原点, 以前进方向为 x 轴, 以横向为 y 轴, p, q 分别为两足到 z_{mp} 的距离, 这样分别作用在两足上的地面反力为

$$\begin{cases} T_a = F_{xa} + F_{ya}, \\ T_b = F_{xb} + F_{yb}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\frac{|T_a|}{|T_b|} = \frac{p}{q}$.

当作用干扰 θ 时, 前后方向作用在两足的垂直地面反力就出现差异, 当时 $h \neq 0$ 时,

$$\begin{cases} F_a = \frac{F}{2} - \frac{\Delta M_y}{2h} + \frac{\Delta M_{ya} + \Delta M_{yb}}{2h}, \\ F_b = \frac{F}{2} - \frac{\Delta M_y}{2h} + \frac{\Delta M_{ya} + \Delta M_{yb}}{2h}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔM_y 是地面反力合力的外界干扰力矩; $\Delta M_{ya}, \Delta M_{yb}$ 是作用在各脚上的地面反力的外界干扰力矩。 $h = 0$ 时, 即使施加外界干扰, 作用在两足上的垂直地面反力也相等。

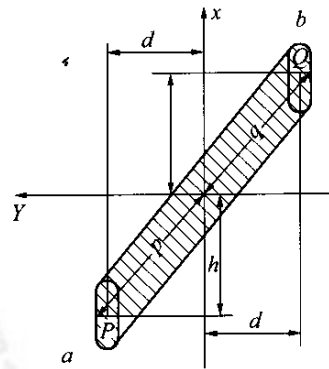


图 3 双脚支撑时受力分析

Fig. 3 Force analysis when two feet stand

利用式 (1) 可计算出 $\Delta M_{ya}, \Delta M_{yb}$, 通过测量可得出 ΔM_y , 这样就可以进行补偿动作, 对于横向外界干扰也能求得同样的关系式。

3.2 从能量的角度稳定性分析

由以上分析知, 机器人步行过程中必须考虑前后方向和横向的干扰, 而从稳定性的角度看, 最危险的是横向的干扰, 为此, 现在从能量的角度对横向的稳定裕量进行探索。

假设机器人的质量为 m , 脚长为 l , z_m 为质心到支撑面的垂直位置, J 为绕质心的转动惯量, 可知其势能为: $E_p = mgz_m, z_m = l_r \cos \theta + l \sin \theta$ 。

其动能为 $E_k = \frac{1}{2} J_0 \dot{\theta}^2$,

式中 J_0 为绕支撑点的转动惯量,其值为 $J_0 = J + m(x_m^2 + z_m^2)$; $x_m = l \cos \theta$.

假设临界点的总能量为 E^* ,使系统稳定的条件为

$$E_p + E_k \leq E^* .$$

对于不同角度的 θ_0 可解得使系统稳定的角速度 $\dot{\theta}_0$,这样便可确定相应的势能 E_{p0} ,从而有

$$E_{k0} \leq E^* + E_{p0} ,$$

即 $\dot{\theta} \leq \frac{2}{J_0} (E^* - E_{p0})$ 就可以求得角速度 $\dot{\theta}_0$ 的容许范围,这样可根据不同角度 θ_0 的数值求得角速度 $\dot{\theta}_0$ 的临界值.对于容许值 θ_0 、 $\dot{\theta}_0$ 的范围,就能求得 $\theta - \dot{\theta}$ 相平面上封闭区域,即相应的稳定裕量,这说明当倾斜角 θ 的大小限于该区域内,则其补偿可自动进行,相应的步行也是稳定的.

综上所述,适当地增加脚跟高度,并不会使机器人的步行稳定性减小,反而可以提高步频,间接地提高稳定度.这里,虽然没有分析着地时关节的振动,但由于脚跟的高度增加了,必然可以减轻关节的振动,提高稳定性.

4 结束语

这里从理论上讨论了增加机器人脚跟对其行走稳定性的影响,结果表明适当地增加机器人的

脚跟可以间接增强其行走的步频,有利于步行的稳定性.该研究证明增加脚跟高度可以增强类人型机器人步行的稳定性,为实际应用提供强有力的理论依据.

参考文献:

- [1] M 伍科布拉托维.步行机器人和动力型假肢[M].北京:科学出版社,1983.
- [2] 柯显信,龚振邦,吴家族,等.双足机器人上楼梯动态规划的合理性要求[J].应用科学学报,2003(3):63-67.
- [3] 田海英,任志玲.基于地面反力最优规划的双足机器人姿态控制[J].辽宁工程技术大学学报,2001(4):196-197.
- [4] 胡洪志,马宏绪.一种双足机器人的步态规划方法[J].机器人技术与应用,2002(3):16-18.
- [5] 陈鹿民,阎绍泽,金德闻.力约束法在人体起跳动力学数值仿真中的应用[J].清华大学学报,2003,43(2):156-159.
- [6] 张永学,麻亮,强文义.基于多传感器信息的双足机器人步行系统的研究[J].高技术通讯,2001(6):66-69.
- [7] 谢涛,徐建峰,李霞.神经网络及误差补偿在HIT-III双足机器人步态规划中的应用[J].中国机械工程,2003,14(2):131-133.
- [8] 刘治,李春文.基于模糊神经网络的5连杆双足机器人混杂控制[J].控制理论与应用,2002,19(3):340-344.

[责任编辑 陈峰]

(上接第531页)

参考文献:

- [1] 王军锋,宋国乡.小波变换的自适应均衡算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2002,27(2):21-24.
- [2] 陈跃波,方惠均.一种引入正交小波的自适应线性自适应均衡算法[J].广西科学,2000,7(4):246-248.
- [3] 刘丰,程俊,王新梅.基于正交规范小波的自适应均衡器[J].电子科学学刊,1997,19(9):637-642.
- [4] 张贤达.通信信号处理[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [5] SANTAMARIA I, ERDOGRMUS D, PRINCIPE J C. Entropy minimization for digital communications channel equalization[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(5):1184-1192.
- [6] SANTAMARIA I, PANTALEON C, VIELVA L, et al. A fast algorithm for adaptive blind equalization using order- α Renyi's entropy[C]. ICASSP IEEE, 2002.
- [7] LI Xiao-hua, FAN H. QR Factorization based blind channel identification and equalization with second-order statistics[J]. IEEE Trans Singal Processing, 2000, 48(1):60-69.
- [8] JITENDRA K T. On blind equalization of simo time-varying channe[J]. IEEE, 2002(1):98-101.
- [9] LOPES R R, BARRY J R. Blind iterative channel identification and equalization[A]. International Conference on Communication[C]. Helsinki, 2001.
- [10] LI Xiao-hua, FAN H. Direct blind equalization with best delay by channel output whitening[J]. IEEE, 2001:1556-1563.

[责任编辑 陈峰]