

类人机器人脚面扭滑建模与检测分析^①

余蕾斌^② 曹其新 邱长伍

(上海交通大学机器人研究所 上海 200240)

摘要 为克服采用零力矩点(ZMP)或脚面所受压力中心(COP)检测方法进行类人机器人稳定性控制时不能防止机器人脚面扭滑的问题,提出了一种基于COP检测的脚面扭滑检测方法,并对其进行了数学建模与分析。对类人机器人 MechG 进行的仿真实验验证了该方法的有效性。仿真结果显示,通过基于COP检测的脚面扭滑检测可以进一步得到不发生扭滑的COP子稳定区域,从而弥补了机器人ZMP/COP法控制的不完善性。

关键词 压力中心(COP),类人机器人,扭滑

0 引言

类人机器人的稳定性控制一般采用零力矩点(zero moment point, ZMP)检测方法。根据 Vukobratovic 提出的机器人在动态平衡时 ZMP 和脚底所受压力中心(center of pressure, COP)重合的特性^[1,2],目前的类人机器人也采用通过 COP 来控制稳定性的方法^[3]。但在采用这两种方法时应注意到,机器人失去平衡时往往伴随着脚面发生扭滑,而在这种情况下 ZMP/COP 的检测结果均不能真实反映机器人的运动学和动力学状态,因此无法对机器人的姿态进行有效调整,难以避免机器人摔倒。另外,ZMP/COP 处于稳定状态的类人机器人,在行走过程中经常因为发生扭滑而改变了行进方向,这样就增加了对机器人行为控制的难度。因此对类人机器人进行稳定性控制仅采用 ZMP/COP 的方法是够充分的,而目前国内还没有相关的文献对该问题及其解决方法进行探讨。本文借助于机器人通用力学方程对 ZMP/COP 控制方法的局限性进行了简要分析,并且在类人机器人 MechG 上进行了验证。在上述分析的基础上,本文提出了一种应用最大摩擦扭矩和摩擦圆半径进行扭滑检测的方法,该方法是在 COP 检测的基础上进行扭滑检测,进一步找到扭滑平衡的 COP。仿真结果验证了该方法的有效性。

1 COP 检测的局限性与扭滑建模

机器人在正常步行时,除了受地面压力和摩擦

力外,在 x, y, z 方向还受到力 $[F_x \ F_y \ F_z]$ 和力矩 $[M_x \ M_y \ M_z]$ 的作用,分别为:

$$\begin{bmatrix} F_x & M_x \\ F_y & M_y \\ F_z & M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i & \sum_{i=1}^n M_{xi} \\ \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i & \sum_{i=1}^n M_{yi} \\ \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i - g) & \sum_{i=1}^n M_{zi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{xi} = m_i y_i (\ddot{z}_i - g) - m_i z_i \ddot{y}_i + U_{ix} \\ M_{yi} = m_i x_i (g - \ddot{z}_i) + m_i z_i \ddot{x}_i + U_{iy} \\ M_{zi} = m_i (x_i \ddot{y}_i - y_i \ddot{x}_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} 分别为作用于机器人各部分 i 处的 x, y, z 方向的力矩; g 为重力加速度; m_i 为类人机器人各部分的质量, (x_i, y_i, z_i) 为机器人各部分的质心坐标, $[U_{ix}, U_{iy}]$ 为机器人各部分之间的关节驱动力矩。

要使类人机器人不发生沿地面的滑移,必须满足下式:

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu F_z \quad (3)$$

因为一个作用力系可以从一个作用点转化到另一个作用点,而得到相同的作用效果。除地面对机器人脚底面的作用力外,机器人所受的外力和外力矩可以转化为通过 ZMP/COP 的等效作用力和力矩。

$$\begin{aligned} \bar{M}_z &= M_z + F_y \cdot x_p - F_x \cdot y_p \\ &= \sum_{i=1}^n m_i (x_i \ddot{y}_i - y_i \ddot{x}_i) + F_y \cdot x_p - F_x \cdot y_p \end{aligned} \quad (4)$$

要不发生扭滑,必须满足下式:

① 863 计划(2006AA04Z261)资助项目。

② 男,1979 年生,博士生;研究方向:类人机器人稳定性与控制;联系人,E-mail: lbyu@sjtu.edu.cn (收稿日期:2007-04-13)

$$(\mu |F_z| - \sqrt{F_x^2 + F_y^2})R \geq |\bar{M}_z| \quad (5)$$

其中, R 为支撑脚的当量摩擦圆半径, μ 为机器人与地面之间的最大静摩擦系数, $(x_p, y_p, 0)$ 表示以外力和外力矩作用点为原点建立的坐标系所描述的 ZMP/COP 位置, 由式(5)得下式:

$$\mu |F_z| - |\bar{M}_z|/R \geq \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (6)$$

因此如果式(6)成立, 必定满足式(3)。而式(6)为 $\mu |F_z| - |M_z + F_y \cdot x_p - F_x \cdot y_p|/R \geq \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$, 所以当 (x_{zmp}, y_{zmp}) (以机器人脚底面几何中心为原点建立的坐标系描述) 满足稳定条件时, 不一定能满足式(6)成立, 即机器人满足 ZMP/COP 稳定条件时也可能发生扭滑。以下用 RoboCup 类人机器人 MechG 为样机(如图 1 所示), 对上述结论在实际环境中发生的可能性作进一步分析。MechG 为 19 自由度机器人, 两条腿各有 6 自由度, 伺服马达额定扭矩 T 为 $10\text{kg}\cdot\text{cm}$, MechG 总重 M 为 2kg , MechG 单只脚底面尺寸为 $a \times b = 9.3\text{cm} \times 4.5\text{cm}$, 地面水平且平整。由于类人机器人单足支撑比双足支撑的稳定更差, 所以下面仅以单足支撑的情况进行讨论。

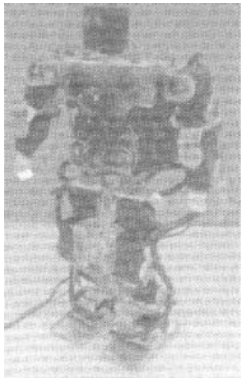


图 1 类人机器人 MechG

MechG 脚底板材料为硬质铝合金(本章节中所指机器人的脚底面均为平整的铝板), 因此不考虑其弹性变形。设压应力呈线性分布, 令 $p = K_1 + K_2x + K_3y$, 其中 K_1, K_2, K_3 为压应力的变化率, p 是以 COP 为原点建立的坐标系所描述, 即 $(x, y) = (0, 0)$ 点处为 COP。

根据式(6)可得下式:

$$r = \frac{|\bar{M}_z|}{\mu |F_z| - \sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \quad (7)$$

因此只要满足当量摩擦圆半径 $R \geq r$ 就能保证

机器人不发生扭滑。

因为机器人脚底面的摩擦和平面轴承端面摩擦概念一致, 所以当量摩擦圆半径可以根据下面方程式求解:

$$R = \frac{M_f}{\mu F_z} \quad (8)$$

$$M_f = \iint \mu \cdot p \sqrt{x^2 + y^2} dx dy \quad (9)$$

M_f 为最大静摩擦扭矩。

因为机器人处于动态平衡状态时重力和惯性力(除了地面反力)对 COP 的力矩为零, 因此地面反力对 COP 的力矩也为零, 即 $M_x = 0, M_y = 0$ 。而根据机器人脚面的压应力线性分布特性, 脚底面的应力分布随着 (x_{zmp}, y_{zmp}) 移动, 因而具有完整充满脚面几何轮廓和非完整充满脚面几何轮廓两种情况, 如图 2 所示。

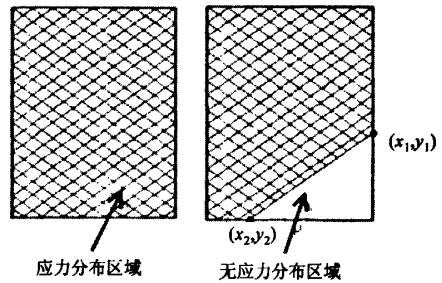


图 2 应力分布的两种情况

当机器人保持平衡时, 有如下公式:

$$\begin{aligned} F_z &= \iint (K_1 + K_2x + K_3y) dx dy \\ M_x &= \iint (K_1 + K_2x + K_3y) \cdot y dx dy \\ M_y &= \iint (K_1 + K_2x + K_3y) \cdot x dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

因此当应力完整充满脚面几何轮廓时, 可得下式:

$$\begin{aligned} K_1 &= (a^2b^2 + 12b^2x_{zmp}^2 + 12a^2y_{zmp}^2)F_z/(a^3 \cdot b^3) \\ K_2 &= 12x_{zmp}F_z/(a^3b) \\ K_3 &= 12y_{zmp}F_z/(ab^3) \\ p &= K_1 + K_2x + K_3y \\ &= ((a^2b^2 + 12b^2x_{zmp}^2 + 12a^2y_{zmp}^2) \\ &\quad + 12b^2x_{zmp}x + 12a^2y_{zmp}y) \cdot F_z/(a^3 \cdot b^3) \end{aligned} \quad (11)$$

应力非完整充满脚面几何轮廓时, 应力分布情况如图 2 中右图所示, 即无压应力区域和有压应力区域是以脚面外轮廓边界上的两点即 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 的连线作为分界线。由于在实际应用中可

通过改变脚底面结构消除这种复杂情况(见下一节中介绍的结构),在这里就不再赘述。

下面以应力完整充满脚面几何轮廓情况,分析类人机器人 MechG 是否会发生扭滑。

根据 MechG 的动力性能,可以设 $[M_z, F_x, F_y] = [10g, 0, 0]$, $F_z = Mg = 2g$, $\bar{M}_z = M_z + F_y \cdot x_p - F_x \cdot y_p = 10g$, 根据对称性,这里仅讨论 (x_{zmp}, y_{zmp}) 位于第一象限时的情况。

根据式(11),可得 (x_{zmp}, y_{zmp}) 的稳定区域为两坐标轴和第一象限内直线 $\frac{x_{zmp}}{9.3} + \frac{y_{zmp}}{4.5} = \frac{1}{6}$ 相交的闭合区间。

当 $(x_{zmp}, y_{zmp}) = (0.5, 0.5)$ 时,把 MechG 参数代入式(8)可得 $R \approx 2.86$ 。

另外可得 $r \approx 5/\mu$, 根据实测到的实验场地和类人机器人硬铝合金脚面的摩擦系数 $\mu \in (0.25, 0.32)$, 显然 $R < r$, 在这种情况下机器人发生扭滑是必然的。

2 扭滑检测分析

根据上述分析,可以通过增大摩擦系数提高机器人的抗扭滑能力,在这里我们选择导电橡胶作为机器人与比赛场地的接触介质,增大最大静摩擦系数(实测得到摩擦系数 $\mu \in (0.72, 0.8)$),同时利用导电橡胶的力-电阻特性(电阻随压力增大而减小)^[4]作为压力传感元件。在类人机器人脚底板4个顶角均布4个导电橡胶圆片(作为着地介质),如图3所示,橡胶圆片半径 $r = 0.5\text{cm}$, 橡胶圆片中心

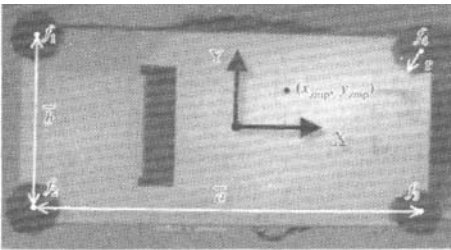


图3 导电橡胶安装图

间距分别为 $\bar{a} = 8.7\text{cm}$, $\bar{b} = 3.9\text{cm}$; f_1, f_2, f_3, f_4 分别表示4个圆片所受压力(f_1, f_2, f_3, f_4 可以根据导电橡胶力-电阻关系,通过测试电压值确定)。利用这种布局可以使 (x_{zmp}, y_{zmp}) 在4个橡胶垫片中心点的连线范围内均可采用上文所述的应力完整充

满脚面几何轮廓时的数学模型(以满足机器人与地面接触点处压应力 p 不为负作为约束条件得到此结果),因此可得下列方程式:

$$K_1 = \frac{F_z}{8\pi r} + \frac{3F_x x_{zmp}^2}{\pi r(6\bar{a}^2 + 4r^2)} + \frac{3F_y y_{zmp}^2}{\pi r(6\bar{b}^2 + 4r^2)}$$

$$K_2 = \frac{3F_x x_{zmp}}{\pi r(6\bar{a}^2 + 4r^2)}$$

$$K_3 = \frac{3F_y y_{zmp}}{\pi r(6\bar{b}^2 + 4r^2)}$$

$$F_z = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$$

$$f_i = \int_{r'}^{\int_{2\pi}} (K_1 + K_2 x + K_3 y) d\theta d\rho$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$F_z = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$$

$$f_i = \int_{r'}^{\int_{2\pi}} (K_1 + K_2 x + K_3 y) d\theta d\rho$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

由公式(12)可得:

$$x_{zmp} = \frac{((f_4 - f_2) + (f_3 - f_1))(3\bar{a}^2 + 2r^2)}{6a(f_1 + f_2 + f_3 + f_4)}$$

$$(13)$$

$$y_{zmp} = \frac{((f_4 - f_2) - (f_3 - f_1))(3\bar{b}^2 + 2r^2)}{6b(f_1 + f_2 + f_3 + f_4)}$$

$$(14)$$

在机器人脚踝关节处安装力/力矩传感器,检测 F_x, F_y 和 M_z , 脚底面和实验场地的摩擦系数 μ 预先测定,短期内的数值变化忽略不计。

对 $(M_z, F_x, F_y, F_z) = (4.3g, 1, 1, 2g)$, $\mu = 0.76$, 比较 COP 检测到的 (x_{zmp}, y_{zmp}) 稳定区域以及在此基础上进行扭滑检测到的 (x_{zmp}, y_{zmp}) 稳定区域的仿真结果。

为了简化计算并且提高稳定性,对式(9)进行处理,得下式:

$$M_f = \iint \mu \cdot p \sqrt{x^2 + y^2} dx dy$$

$$\geq \iint \mu \cdot p \frac{x+y}{\sqrt{2}} dx dy$$

$$(15)$$

根据机器人 MechG 脚踝处的结构特点,可以认为脚底板所受外力和外力矩作用点和脚底面几何中心重合,所以 $(x_p, y_p) = (x_{zmp}, y_{zmp})$, 根据式(4)可得下式:

$$\bar{M}_z = M_z - F_x \cdot y_{zmp} + F_y \cdot x_{zmp}$$

$$(16)$$

因此,如果满足下式:

$$\frac{\iint \mu \cdot p \frac{x+y}{\sqrt{2}} dx dy}{\mu F_z} \geq r$$

$$(17)$$

必定满足 $R \geq r$ 。

应用上面的参数进行仿真实验,得到 COP 稳定的 (x_{zmp}, y_{zmp}) 区域如图4所示(坐标系原点 $(x, y) = (0, 0)$ 表示机器人脚底面几何中心,见图3),长

方形轮廓线为机器人脚底面4个橡胶垫片中心点的连线,当 (x_{zmp}, y_{zmp}) 在该轮廓以内区域时,满足COP稳定。图中黑色阴影区域为不发生扭滑的COP区域。当 (x_{zmp}, y_{zmp}) 在长方形廓线以内,黑色阴影区域以外时,机器人发生扭滑但不会倾倒,在两者公共区域内时,机器人既不发生倾倒,也不发生扭滑。

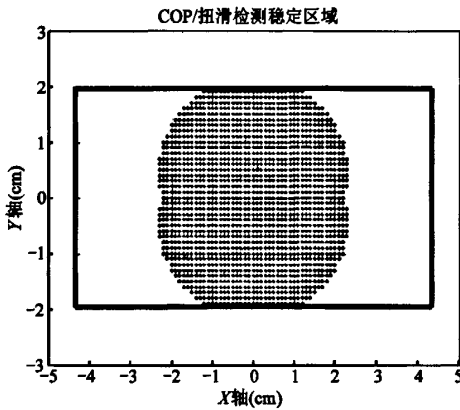


图4 基于COP的扭滑检测稳定区域

3 结论

本文分析了类人机器人ZMP/COP稳定性控制方法的局限性,认为对类人机器人进行稳定性控制

仅采用ZMP/COP检测是不够完善的。本文从受力平衡分析入手,对类人机器人MechG进行了深入探讨,在此基础上,建立了扭滑数学模型以及脚底面压应力数学模型,并分析了最大静摩擦扭矩以及摩擦圆半径,最后提出了在COP检测基础上的扭滑检测方法。仿真证明,该方法可以在COP稳定区域内检测出不发生扭滑的COP子稳定区域,可为机器人运动的稳定性控制提供更充分的信息。

参考文献

- [1] Vukobratovic M, Borova B, Surdilovic D. Zero-moment point-proper interpretation and new application. In: Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Tokyo, 2001. 237-244
- [2] Sardain P, Bessonnet G. Forces acting on a biped robot: center of pressure-zero moment point. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 2004, 34(5):630-637
- [3] Spampinato G, Muscato G. DIEES Biped Robot: A bio-inspired pneumatic platform for human locomotion analysis and stiffness control. In: The 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Genova, Italy, 2006.478-483
- [4] Kagami S, Takahashi Y, Nishiwaki K, et al. High-speed matrix pressure sensor for humanoid robot by using thin force sensing resistance rubber sheet. *Sensors*, 2004,3:1534-1537

The slide modeling and detecting analysis for humanoid robots

Yu Leibin, Cao Qixin, Qiu Changwu

(Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract

To solve the problem of foot sliding of humanoid robot when its walking stability is controlled with the zero moment point (ZMP) or center of pressure (COP) detecting approaches, a slide detecting approach based on COP detecting is put forward, and its mathematical model is built and analyzed. The simulation of the humanoid robot MechG based on the COP detecting approach shows that a stable sub-zone of COP without slide can be obtained, by which the stability of humanoid robots can be increased.

Key words: center of pressure (COP), humanoid robots, slide