

基于力矩传感器的双足机器人 在线模糊步态调整器设计*

麻 亮 纪军红 强文义 傅佩琛
(哈尔滨工业大学控制科学与工程系 150001)

摘 要 双足机器人动态行走时,零力矩点轨迹与期望值之间存在一定偏差。利用机器人力矩传感器的输出信号,结合动力学算法实时计算零力矩点的位置,并利用基于模糊逻辑的步态调整算法修正踝关节处的 4 个关节角,以达到降低零力矩点位置误差,提高系统动态行走稳定性的目的。仿真和实验证实了该算法的有效性。

关键词 双足机器人,力矩传感器,零力矩点,模糊算法
分类号 TP 242

Design of On-line Fuzzy Gait Adjuster of Biped Robot Using Torque Sensors

Ma Liang, Ji Junhong, Qiang Wenyi, Fu Peichen
(Harbin Institute of Technology)

Abstract For a biped-walking robot, there is always some deviation between the actual ZMP (Zero Moment Point) trajectory and the desired one in real walking. During walking, the real-time ZMP trajectory can be obtained from the output signals of torque sensors. By comparing with the off-line planned ZMP trajectory, and using fuzzy logic to adjust the four ankle-joint angles, the ZMP deviation can be decreased. Simulation results show that the dynamic stability is improved by the proposed algorithm.

Key words biped walking robot, torque sensor, zero moment point, fuzzy strategy

1 引 言

双足机器人的最基本要求就是保持行走过程稳定。静态步行时,重心的位置决定其稳定性;而动态步行时,零力矩点(ZMP)则起着决定作用^[1,2]。零力矩点,即在行走时机器人所受的地面反力对该点合力矩为零的点。若将这些分布作用的反力等效为一个合力,则零力矩点即为该力的等效作用点。此外,零力矩点又代表机器人动态行走时所受的重力和惯性力的合力在地面投影的位置^[3]。

在步态规划过程中,任一瞬间系统零力矩点的

位置为

$$\left\{ \begin{aligned} r_{zmpx} &= - \frac{\sum_{i=1}^n (r_p^i \times F_i + N_i)_y}{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{F}_i \right)_z} \\ r_{zmpy} &= - \frac{\sum_{i=1}^n (r_p^i \times F_i + N_i)_x}{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{F}_i \right)_z} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

其中, x 轴和 z 轴的正方向分别沿前进和垂直向上方向定义, y 轴的方向由右手规则确定;下标 $(\cdot)_x$ 代表矢量在 x 轴上的投影,其余下标类似; F_i 和 N_i 分别代表作用于杆件 i 质心的外力和外力矩之和; r_p^i 是关节 i 相对于参考坐标系的位置。当关节运动已知

时, 可用递推 Newton-Euler 法的正向过程计算参数 r_p^i , 再用反向过程计算 F_i 和 N_i , 进而得到整个过程的零力矩点轨迹。

实际行走时, 由于受各种因素的影响(如地面与理想条件不符, 系统模型不准确, 运动学上未考虑某些非线性, 动力学方程中各矩阵的计算误差等), 零力矩点与期望位置之间总存在一定偏差。当误差过大时, 必然影响行走过程的稳定。因此, 本文考虑利用力矩传感器的输出信号, 通过一定算法得到零力矩点的位置, 并与期望值比较, 利用基于模糊逻辑的步态调整算法, 修正踝关节处 4 个关节角, 以达到降低零力矩点位置误差, 提高系统动态行走稳定性的目的。

2 力矩传感器设计和零力矩点的计算

2.1 力矩传感器和滤波器设计

足底力矩传感器包括脚的前向和侧向对称轴上的 8 片应变片电阻, 每 4 片构成一个电桥。在脚悬空无地面反力时, 4 个桥臂电阻阻值相同, 传感器的输出端只有一恒值偏置电压; 当脚接触地面时, 接触力导致应变片的形状和阻值发生改变, 传感器的输出端除恒值电压外还叠加一电压信号。经标定可得到该电压的幅值与分布地面反力绕前向和侧向对称轴产生的合力矩间的对应关系。我们在标定时发现, 各回路均存在一个现象; 当外加力矩单调增大或减小时, 输出电压和力矩之间形成一条近似线性的曲线。在实际使用时, 应根据该信号的变化趋势确定相应的力矩值, 同时为提高信号的可信度, 应避免力矩的波动, 使其尽可能单调变化。

HIT- 机器人的关节均由直流伺服电机驱动, 电机运动会产生很强的电磁干扰, 由原理分析可知, 主要为高频分量干扰。为消除其影响, 除在硬件上采取屏蔽措施外, 还需在软件上设计数字滤波算法。通过在机器人静止、悬空运动及不同条件下进行多次行走实验, 最后确定采用低通数字滤波器。滤波效果如图 1 所示, 其中图(a) 是两个步行周期中绕左脚 X 轴向的力矩传感器原始信号, 图(b) 是经过数字滤波器后的信号。可以看出: 左脚有两次处于悬空状态, 这时力矩传感器输出应为一个恒值偏置电压, 但原始输出信号中存在较严重的毛刺; 而本文算法则有效地抑制了信号中的毛刺, 同时带来的信号滞后相对于系统的机械时间常数而言是可以

接受的。

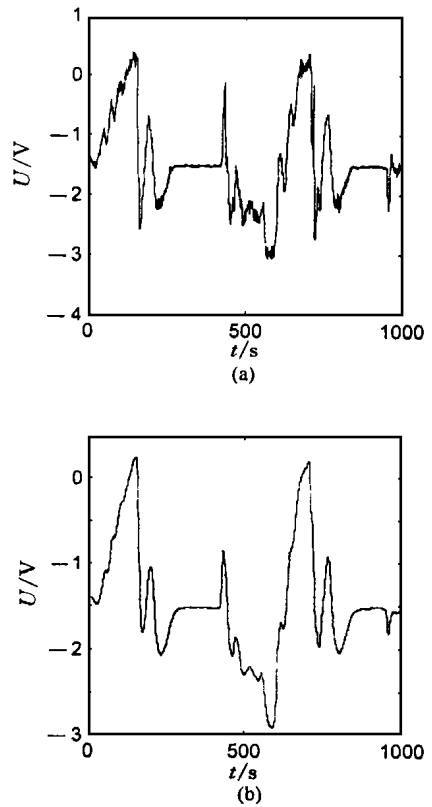


图 1 行走过程中滤波前后力矩传感器信号
(a) 滤波前信号 (b) 滤波后信号

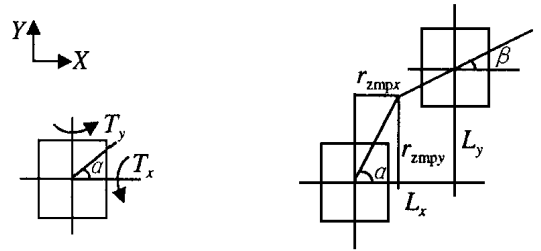


图 2 单脚支撑期 ZMP 位置 图 3 双脚支撑期 ZMP 位置

2.2 在线零力矩点计算方法

若将分布作用在整个足底的地面反力看作一个等效合力, 则力矩传感器检测到的便是这个合力绕 X 轴和 Y 轴产生的力矩 T_x 和 T_y , 但却不能直接反映该力的大小和作用位置。若力矩的方向定义如图 2 所示, 则合力的作用点必位于一条直线上, 该直线与 X 轴的夹角为 α 且有

$$\alpha = \arctan(T_x / T_y) \quad (2)$$

在双脚支撑期间, 双脚底部的传感器都有信号输出, 由它们可各自得到一条直线, 其交点就是零力矩点, 如图 3 所示。图中 L_x 和 L_y 代表前脚相对于后脚的位置, 可由运动学正方程确定; α 和 β 分别为两

脚传感器信号所确定直线与 X 轴形成的夹角; 零力矩点相对后脚中心的位置为

$$r_{zmpx} = \frac{L_y - L_x \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} r_{zmpy} = r_{zmpy} \tan \alpha \quad (3)$$

单脚支撑期间摆动脚不受外力, 这时可用递推 Newton-Euler 法计算出机器人的杆件 1 对杆件 0 支撑脚的作用力 f^1 及其在垂直方向的分量 f_z^1 。设地面反力为 f_r , 杆件 1 在垂直方向满足力平衡方程

$$f_r + f_z^1 = m_1 g \quad (4)$$

利用式(2)和(4), 便可求出反力的大小和作用位置即零力矩点。由于递推 Newton-Euler 法计算量很小, 可在伺服系统的一个采样周期内完成, 因而保证了在行走过程中实时获得零力矩点的位置。

3 基于模糊算法的在线步态调整器设计

利用式(2)和(4)得到的零力矩点轨迹中, 仍有计算噪声。但由实验得知: 在实际行走时, 如此得到的零力矩点位置比利用式(1)得到的期望位置更能反映系统零力矩点的真实变化趋势。鉴于上述情况, 本文不采用精确的解析方法, 而是通过设计基于模糊算法的步态调整器来对离线规划的步态进行在线修正。踝关节的运动对行走的稳定性有很大影响^[4]。人在实际行走时对于变化不很剧烈的地面一般也只对踝关节的动作做一些调整。另外, 由系统动力学分析可知, 行走时踝关节的驱动力矩相对于其它关节较小, 因此需要确定步态调整器, 以便对双脚踝关节的角位置进行修正。该步态调整器设计的主要特点如下:

1) 以零力矩点的位置误差和误差的变化量作为输入, 以双脚踝关节处 4 个自由度(每只脚的踝关节处各有一个前向和侧向自由度)的修正量为输出, 最终目标是降低零力矩点的位置误差。

2) 为提高收敛速度, 降低角度的波动, 采用文献[5]提出的模糊算法, 在对误差及其变化量进行量化时乘以不同的加权因子。实际运行时根据误差及其变化量的数值和变化趋势实时调整加权因子的数值, 以体现在不同情况下对误差及其变化量的不同重视程度。当误差数值较大时, 应提高对误差本身的重视程度, 以便快速、有效地降低零力矩点的位置误差; 当误差数值较小但误差的变化率较大时, 应提高对误差变化率的重视程度, 从而有效地防止关节角度超调和震荡现象的产生, 对保证行走过程的稳定性具有很大的现实意义。关节角度的修正公式为

$$\begin{cases} u = -\alpha E + (1 - \alpha) C \\ \alpha = \frac{1}{N}(\alpha_0 - \alpha_1) |E| + \alpha_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, u , E 和 C 分别为与关节角度的修正量、误差和误差变化对应的模糊量; N 为量化等级, 即 u , E 和 C 的论域选为: $\{u\} = \{E\} = \{C\} = \{-N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N\}$; α 为可调整的加权因子, 且满足 $0 < \alpha < 1$, $\alpha \in [\alpha_0, \alpha_1]$ 。实验中各参数选定为: $\alpha_0 = 0.4$, $\alpha_1 = 0.9$, $N = 10$ 。

3) 如上所述, 在修正过程中应避免导致力矩的波动, 使其在某一步行阶段尽可能单调变化。

4 仿真实验

利用基于模糊算法的在线步态调整器对双足机器人动态行走进行仿真, 实验结果如图 4 所示, 其中图(a)是离线规划时得到的期望零力矩点轨迹, 图(b)是经过在线修正的实测零力矩点轨迹。可以看出, 当地面符合理想平面条件时, 与未经步态修正相比, 模糊步态修正器明显降低了行走时零力矩点与规划值之间的偏差。另外, 在未考虑外界条件变化的情况下, 可有效地降低系统模型中不确定因素的影响, 从而保证了行走过程具有更好的稳定性。

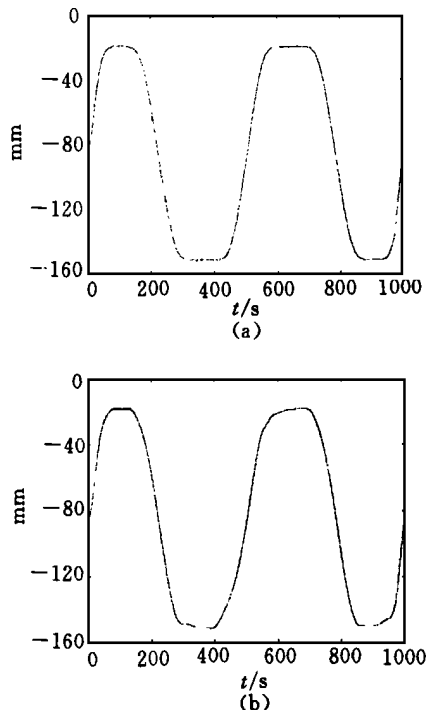


图 4 实验结果曲线

- (a) 离线规划时期望零力矩点轨迹
(b) 在线修正后的实测零力矩点轨迹

参考文献

- 1 赵子尧. 一种提高数据传输速率的方法. 见: 1986 年全国数据通信学术会议论文集. 1986
- 2 张旭. 在瞬态检测中用无失真滤波器抑制邻道干扰. 东北大学硕士学位论文, 1999
- 3 张旭, 王永军. 一种抑制邻道干扰的无失真滤波器方法. 控制与决策, 1999, 14(S): 621~624

作者简介

王永军 男, 1946 年生. 现为东北大学信息科学与工程

学院教授. 研究方向为电子技术应用、数字信号处理和图象处理。

史捷 男, 1956 年生. 现为沈阳铁路工程建设集团信息处理中心工程师. 研究方向为计算机信息处理和计算机网络。

张旭 男, 1963 年生. 1999 年于东北大学获硕士学位, 现为沈阳军区指挥自动化站工程师. 研究方向为无线通信。

陈辉 男, 1971 年生. 1995 年毕业于东北大学, 现为东北大学计算中心助理工程师. 研究方向为多媒体技术。

(上接第 736 页)

参考文献

- 1 Shuuji Kajita. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8(4): 431~437
- 2 P H Channon. Derivation of optimal walking motions for a bipedal walking robot. Robotica, 1992, 10(2): 165~172
- 3 W Thomas Miller. Real-time neural network control of a biped walking robot. IEEE Control System, 1994, 14(1): 41~48
- 4 刘志远. 双足机器人动态行走研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1991
- 5 纪军红. 造纸过程水分控制系统研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1994

作者简介

麻亮 男, 1969 年生. 1998 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现在哈尔滨工业大学从事博士后研究. 主要研究方向为机器人控制, 高精度伺服系统。

纪军红 男, 1972 年生. 1996 年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 2000 年获得博士学位. 主要研究方向为机器人控制, 机器人学。

强文义 男, 1937 年生. 1960 年毕业于哈尔滨工业大学电机系, 现为该校控制工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为智能控制, 鲁棒控制, 过程控制。

傅佩琛 男, 1932 年生. 1960 年毕业于哈尔滨工业大学控制工程系, 现为该校控制工程系教授. 主要研究方向为机器人学, 机器人控制, 智能控制。

(上接第 739 页)

参考文献

- 1 解学书. 最优控制理论. 北京: 清华大学出版社, 1987
- 2 J C Willems. Dissipative dynamical system. Arch Rat Mech Anal, 1972, 45: 321~393
- 3 Van Der Schaft A J. L_2 -gain analysis of nonlinear system and nonlinear state feedback H^∞ control. IEEE Trans on AC, 1992, 37(6): 770~784
- 4 P J Moyland, Brian D O Anderson. Nonlinear regulator theory and inverse optimal control problem. IEEE Trans on AC, 1973, 18(5): 683~691
- 5 Liu J S. Robustness of optimal nonlinear regulators under actuator and additive perturbations. Control

Theory and Advanced Technology, 1993, 8(4): 779~787

作者简介

谢世杰 男, 1966 年生. 1993 年于北京航空航天大学获硕士学位, 现为西北工业大学博士生. 研究方向为非线性系统理论和鲁棒控制。

于茜 女, 1976 年生. 1997 年毕业于西北工业大学, 现为西北工业大学硕士生. 研究方向为鲁棒控制。

吴旭光 见本刊 1999 年第 14 卷第 5 期第 437 页。

徐德民 见本刊 1993 年第 8 卷第 1 期第 218 页。