

考虑关节角加速度约束的 仿人机器人偏摆力矩控制方法

杨 亮^{1,3}, 付根平², 陈 勇³

(1. 电子科技大学中山学院计算机学院, 广东中山 528402; 2. 仲恺农业工程学院自动化工程系, 广东广州 510225;
3. 电子科技大学自动化工程学院, 四川成都 611731)

摘 要: 针对仿人机器人步行过程中存在的机器人关节角加速度约束影响控制性能的问题, 提出一种考虑关节角加速度约束的仿人机器人偏摆力矩控制方法. 该方法充分考虑了双臂在摆动过程中对偏摆力矩的影响, 根据力矩平衡条件得到需要抵消的偏摆力矩的大小与方向, 将偏摆力矩的控制问题转化为带约束条件的二次规划问题, 并设计了一种在线变步长迭代算法计算得到优化后的双臂摆动轨迹. 实验表明, 该方法能有效抵消机器人步行中产生的偏摆力矩, 避免控制过程中的“削峰”现象, 有效提高机器人的步行稳定性.

关键词: 仿人机器人; 偏摆力矩; 关节角加速度约束; 二次规划; 零力矩点

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2019)02-0475-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.02.031

Yaw Moment Control for Humanoid Robot with Joint Acceleration Constraints

YANG Liang^{1,3}, FU Gen-ping², CHEN Yong³

(1. School of Computer Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan Institute, Zhongshan, Guangdong 528402, China;
2. School of Automation, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China;
3. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: To cancel the effect on control performance due to joint acceleration constraints during humanoid robot walks, a new yaw moment control approach with consideration of joint acceleration constraints is proposed. After analyzing the effect on stability caused by the motion of arms swing, the undesired yaw moment which needs to be counteracted is computed. Then, the yaw moment control problem is formulated as a quadratic programming problem with inequality constraints. To solve this optimization problem effectively, an online variable step-size iteration method is designed to generate the trajectories of arms swinging. The experiment and simulation results verified that the proposed approach can effectively compensate yaw moment, avoid peak cut-off phenomenon and guarantee the stable walking.

Key words: humanoid robot; yaw moment; joint acceleration constraints; quadratic programming; zero moment point

1 引言

与轮式移动机器人^[1,2]相比, 仿人机器人具有更易于融入人们日常生活的类人外形及更强越障能力的双足运动方式; 近年来, 仿人机器人步行稳定性的研究已引起研究学者的广泛关注, 并取得可喜的成

果^[3-5]. 零力矩点 (Zero Moment Point, ZMP) 准则是 Vukobratovic 于 1969 年提出的仿人机器人双足步行稳定判据, 目前已广泛应用于包括 ASIMO、HRP 等在内的诸多仿人机器人, 并涌现出一大批基于 ZMP 稳定判断的步行控制方法^[6-10]. 文献[6]提出了一种基于零力矩点区域的步态生成方法, 通过优化步行周期、步

收稿日期: 2017-02-26; 修回日期: 2018-08-26; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61573108, No. U1613223, No. U1501251, No. U1613223); 广东省自然科学基金 (No. 2016A030313715, No. 2016A030313018); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. ZYGX2016J140); 四川省科技支撑计划 (No. 2016GZ0395, No. 2017GZ0395, No. 2017GZ0394); 中山市科技计划 (No. 2017A1024, No. 2017SF0603)

长、落脚点位置等参数改变机器人质心 (Center of Mass, CoM) 位置与速度, 将零力矩点控制在支撑脚底的凸形区域内以维持动态平衡. 文献[7]针对不平整地面环境提出了一种在线稳定控制算法, 通过实时落地控制实现不平整地面稳定步行. 为解决机器人在步行过程中能量消耗大、室外续航时间短的问题, 国内外研究学者对机器人步行能量优化控制策略进行了进一步的研究. 受人类步行经验的启发, 文献[8]提出了一种基于移动 ZMP 稳定判据的步态优化方法, 即理想的 ZMP 轨迹不再固定于足底中心, 而是可以在足底稳定区域内移动以生成更自然的步态. 在此基础上, 文献[9]基于线性倒立摆模型采用傅立叶级数对机器人步态进行参数化建模, 通过优化参数生成理想步态. 文献[10]根据当前状态采用模糊逻辑系统推导出下一时刻理想的 ZMP 位置, 并以能量消耗小为目标采用迭代算法沿梯度方向优化得到理想的髋关节轨迹, 实现稳定步行. 虽然以上成果已取得了较好的控制效果, 但均忽略了偏摆力矩对机器人步行稳定性的影响, 正如文献[11~13]指出的, 随着步行速度的增加, 偏摆力矩对稳定性的影响也将变得更加明显, 当地面摩擦力不足以抵消偏摆力矩的影响时, 机器人将偏离预定轨迹, 甚至发生侧滑或摔倒.

为解决此问题, 文献[11]通过转动腰关节产生一个与偏摆力矩大小相等方向相反的力矩, 以维持垂直方向力矩平衡. 在此基础上, 文献[12]基于连杆模型采用球面坐标系计算偏摆力矩大小, 通过髋关节的转动抵消偏摆力矩的影响, 该方法的优点在于充分考虑了转动惯量对偏摆力矩大小的影响, 建模更准确. 然而, 通过腰关节或髋关节转动的方式存在能量消耗大、步态不自然的问题. 受人类步行时习惯双臂摆动的启发, 文献[13]提出了一种采用双臂摆动抵消偏摆力矩的步行控制方法, 与文献[11, 12]相比, 采用双臂摆动方式生成的机器人步态更自然, 且对原有步态影响小. 为提高控制性能, 文献[14]基于连杆模型以机器人运动过程中偏摆力矩最小为目标进行全局寻优, 计算得到双臂摆动轨迹, 提高步行稳定性. 目前, 在仿人机器人偏摆力矩控制方面已取得可喜进展, 但以上方法均未考虑执行机构的物理限制, 如电机最大转动力矩、最大加速度等限制, 这些都制约了上述控制方法的进一步应用.

针对以上问题, 本文提出了一种考虑关节角加速度约束的偏摆力矩控制方法, 该方法对双臂摆动模型进行建模, 充分考虑了电机物理约束对控制性能的影响, 将偏摆力矩的控制问题转化为带约束条件的二次规划问题, 并提出了一种基于变分不等式^[15]的在线变步长迭代算法, 得到优化后的双臂摆动轨迹. 与以往方

法^[11~14]不同的是, 该方法有效避免了因电机自身物理限制造成的“削峰”现象, 具有更好的应用价值与控制性能.

2 问题描述

为方便描述问题描述, 将机器人身体各部分简化为质量均匀的连杆, 其示意图如图 1 所示.

机器人各连杆中心位置坐标可表示为 $r_i = (x_i, y_i, z_i)$, 其中 i 表示第 i 根连杆且 $i \leq N$, N 为机器人拥有的自由度数目; 步行过程中, 机器人产生的关于零力矩点的总力矩 M_{robot} 可表示为^[12]

$$M_{\text{robot}} = \sum_{i=1}^n m_i (r_i - r_{\text{zmp}}) \times (\ddot{r}_i + g) \quad (1)$$

其中, $r_{\text{zmp}} = (x_{\text{zmp}}, y_{\text{zmp}}, 0)$ 且 ZMP 可表示为

$$x_{\text{zmp}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (g + \ddot{z}_i) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (g + \ddot{z}_i)} \quad (2)$$

$$y_{\text{zmp}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (g + \ddot{z}_i) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (g + \ddot{z}_i)} \quad (3)$$

其中, $(\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i)$ 表示第 i 根连杆中心点加速度, g 代表重力加速度, m_i 为第 i 根连杆的质量.

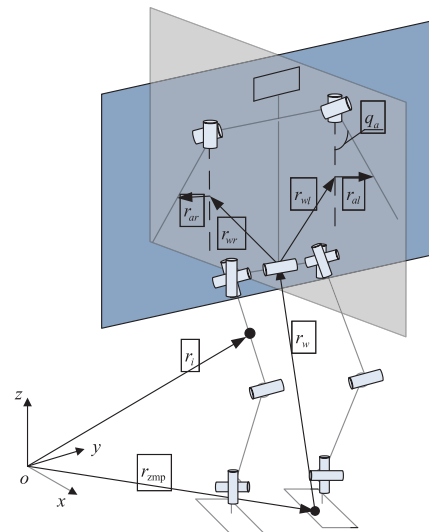


图1 仿人机器人连杆模型

由于机器人身体各部分在不同平面内运动, 因而不可避免的会产生一个绕支撑腿旋转力矩, 这个力矩被称为偏摆力矩^[14], 为保持身体平衡, 有如下不等式成立:

$$M_R^c \geq M_{\text{robot}}^c \quad (4)$$

其中, M_{robot}^c 代表偏摆力矩, M_R^c 表示地面反作用力矩的垂直分量, 由文献[14]可知, 偏摆力矩可由下式计算

得到:

$$M_{\text{robot}}^z = \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i (x_i - x_{\text{zmp}}) - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i (y_i - y_{\text{zmp}}) \quad (5)$$

由人类步行经验可知,机器人以左腿为支撑腿,右腿为摆动腿迈步时,会产生一个绕支撑腿逆时针方向的偏摆力矩,为平衡该力矩增强步行稳定性,双臂会自然的反方向摆动.为简化计算,将参考坐标系原点 O 设置于支撑脚的零力矩点,令 M_{al} 、 M_{ar} 分别表示左右臂在摆动过程中产生的力矩,其力矩表达式如下

$$M_{al} = (r_w + r_{wl} + r_{al}) \times m_a (\ddot{r}_w + \ddot{r}_{wl} + \ddot{r}_{al}) \quad (6)$$

$$M_{ar} = (r_w + r_{wr} + r_{ar}) \times m_a (\ddot{r}_w + \ddot{r}_{wr} + \ddot{r}_{ar}) \quad (7)$$

为准确评估双臂摆动对稳定性的影响,首先计算左右臂在不摆动状态下(如虚线所示)所产生的绕支撑腿的力矩 M'_{al} 、 M'_{ar} ,其表达式如下所示.

$$M'_{al} = (r_w + r_{wl}) \times m_a (\ddot{r}_w + \ddot{r}_{wl}) \quad (8)$$

$$M'_{ar} = (r_w + r_{wr}) \times m_a (\ddot{r}_w + \ddot{r}_{wr}) \quad (9)$$

双臂摆动产生的力矩可表示为

$$M_a = M_{al} + M_{ar} - M'_{al} - M'_{ar} \quad (10)$$

假定机器人在步行过程中遵循以下原则:左右臂仅在矢状面内摆动,且摆动方向相反大小相同.因此有 $\ddot{r}_{al}^x = -\ddot{r}_{ar}^x$, $\ddot{r}_{al}^y = \ddot{r}_{ar}^y = 0$ 且 r_{wl} 、 r_{wr} 均为常量.化简式(6)~(9)并代入式(10),可得

$$M_a^z = (M_{al} - M'_{al})^z + (M_{ar} - M'_{ar})^z = -2m_a \ddot{r}_{al}^x r_{wl}^y \quad (11)$$

其中, m_a 为手臂质量, r_{al}^x 表示左臂在摆动过程中其质心相对于垂直状态下质心位置的向量在 x 方向的分量, r_{wl}^y 为垂直状态下左臂质心相对于两髋关节中心点的位置坐标.假设两肩关节之间的距离为 W_s ,则有 $r_{wl}^y = \frac{1}{2} W_s$.

根据几何关系,进一步化简式(11),可得

$$M_a^z = \frac{1}{2} m_a W_s l_a ((\dot{q}_a)^2 \sin(q_a) - \ddot{q}_a \cos(q_a)) \quad (12)$$

其中, l_a 为手臂长度, q_a 为手臂与垂直方向的夹角.

3 考虑角加速度约束的偏摆力矩控制

3.1 建立优化方程

为有效抵消偏摆力矩对稳定性的影响,文献[14]通过遍历摆动角参数得到优化后的双臂摆动轨迹达到稳定步行的目的,但该方法没有考虑实际应用过程中关节角加速度的物理约束对控制性能的影响,另一方面,遍历寻优的方式也难以满足实时性的要求.

针对以上问题,以双臂摆动的关节角加速度最小为优化目标,将偏摆力矩控制问题转化为一个带不等式约束二次规划问题,其优化方程如下

$$\min J = \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{q}}_a^T \mathbf{Q} \ddot{\mathbf{q}}_a \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{G} \ddot{\mathbf{q}}_a \leq d \quad (14)$$

$$\zeta^- \leq \ddot{q}_a \leq \zeta^+ \quad (15)$$

其中,

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \begin{bmatrix} \ddot{q}_a^l \\ \ddot{q}_a^r \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{G} = [\cos(q_a^l), \cos(q_a^r)] \quad (17)$$

$$d = (\dot{q}_a)^2 \sin(q_a) - \frac{2M_{\text{robot}}^z}{m_a W_s l_a} \quad (18)$$

\mathbf{Q} 为正定对称矩阵, \dot{q}_a 及 \ddot{q}_a 分别表示手臂摆动角的速度与加速度, ζ^- 、 ζ^+ 分别代表肩关节转动角加速度的取值范围.

3.2 基于变分不等式的变步长迭代算法

式(13)~(15)为带不等式约束的二次规划问题,由文献[15~17]可知,该二次规划问题等价于求解以下变分不等式:

$$(\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}^*)^T (\mathbf{K} \boldsymbol{\eta}^* + \mathbf{c}) \geq 0, \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in \Omega \quad (19)$$

其中,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{G}^T \\ \mathbf{G} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -d \end{bmatrix}, \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^n$ 是原对偶变量, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ 及 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n-m}$ 为对偶向量.

引理 1^[16,17] 求解变分不等式(19)的解等价于寻找投影函数(20)的零点问题,

$$f(\boldsymbol{\eta}) := \boldsymbol{\eta} - P_{\Omega}(\boldsymbol{\eta} - (\mathbf{K} \boldsymbol{\eta} + \mathbf{c})) \quad (20)$$

$$\text{其中, } P_{\Omega}(\eta_i) = \begin{cases} \eta_i^-, & \text{if } \eta_i < \eta_i^- \\ \eta_i, & \text{if } \eta_i^- \leq \eta_i \leq \eta_i^+ \\ \eta_i^+, & \text{if } \eta_i > \eta_i^+ \end{cases}$$

当 $\boldsymbol{\eta} \neq \boldsymbol{\eta}^*$, 则采用迭代式(21)可最终得到式(20)的解.

$$\boldsymbol{\eta}^{t+1} = \boldsymbol{\eta}^t - \frac{1}{2} \alpha(\boldsymbol{\eta}^t) d(\boldsymbol{\eta}^t) \quad (21)$$

$$\alpha(\boldsymbol{\eta}^t) = \frac{\|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2}{\|d(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2} \quad (22)$$

$$d(\boldsymbol{\eta}^t) = (\mathbf{I} + \mathbf{G}^T) f(\boldsymbol{\eta}^t) \quad (23)$$

其中,且 $\alpha(\boldsymbol{\eta}^t)$ 为步长, $d(\boldsymbol{\eta}^t)$ 代表搜索方向, \mathbf{I} 为单位矩阵.

定理 1 由迭代式(21)产生的 $\boldsymbol{\eta}^t$ 序列,满足

$$\|\boldsymbol{\eta}^{t+1} - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 \leq \|\boldsymbol{\eta}^t - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 - \frac{3}{4} \alpha(\boldsymbol{\eta}^t) \|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 \quad (24)$$

其中, $\boldsymbol{\eta}^* \in \Omega^*$ 为最优解,即序列 $\boldsymbol{\eta}^t$ 将收敛于最优解 $\boldsymbol{\eta}^*$,且式(13)~(15)的最优解向量 $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}$ 为向量 $\boldsymbol{\eta}^*$ 的前 m 个元素.

证明

将 $\boldsymbol{\eta}^{t+1}$ 展开,则有

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{\eta}^{t+1} - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 &= \|\boldsymbol{\eta}^t - \frac{1}{2}\alpha(\boldsymbol{\eta}^t)d(\boldsymbol{\eta}^t) - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 \\ &= \|\boldsymbol{\eta}^t - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 + \frac{1}{4}\alpha^2(\boldsymbol{\eta}^t)(d(\boldsymbol{\eta}^t))^T d(\boldsymbol{\eta}^t) \\ &\quad - \alpha(\boldsymbol{\eta}^t)(\boldsymbol{\eta}^t - \boldsymbol{\eta}^*)^T d(\boldsymbol{\eta}^t)\end{aligned}$$

由文献[15],得

$$(\boldsymbol{\eta}^t - \boldsymbol{\eta}^*)^T d(\boldsymbol{\eta}^t) = (\boldsymbol{\eta}^t - \boldsymbol{\eta}^*)^T (\mathbf{G}^T + \mathbf{I})f(\boldsymbol{\eta}^t) \geq \|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2$$

因此,有

$$\|\boldsymbol{\eta}^{t+1} - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 \leq -\frac{3}{4}\alpha(\boldsymbol{\eta}^t)\|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 + \|\boldsymbol{\eta}^t - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 \quad (25)$$

取 $t=0,1,\dots,k$,代入不等式(25),并对所有不等式进行求和,得

$$\frac{3}{4}\sum_{t=0}^k \alpha(\boldsymbol{\eta}^t)\|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 \leq \|\boldsymbol{\eta}^0 - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 - \|\boldsymbol{\eta}^{k+1} - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 \quad (26)$$

由 $\|d(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 = \|(\mathbf{G}^T + \mathbf{I})f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 \leq \|\mathbf{G}^T + \mathbf{I}\|^2 \|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2$ 得

$$\alpha(\boldsymbol{\eta}^t) = \frac{\|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2}{\|d(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2} \geq \frac{1}{\|\mathbf{G}^T + \mathbf{I}\|^2} \quad (27)$$

将式(27)代入式(26),得

$$\begin{aligned}\sum_{t=0}^k \|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 &\leq \kappa(\|\boldsymbol{\eta}^0 - \boldsymbol{\eta}^*\|^2 - \|\boldsymbol{\eta}^{k+1} - \boldsymbol{\eta}^*\|^2) \\ &\leq \kappa\|\boldsymbol{\eta}^0 - \boldsymbol{\eta}^*\|^2\end{aligned} \quad (28)$$

其中, $\kappa = \frac{4}{3}\|\mathbf{G}^T + \mathbf{I}\|^2$.

由式(28)可知,存在一个正数 $\mu \in [0, \kappa\|\boldsymbol{\eta}^0 - \boldsymbol{\eta}^*\|^2]$,满足以下等式:

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \sum_{t=0}^k \|f(\boldsymbol{\eta}^t)\|^2 = \mu \quad (29)$$

因此, $\lim_{t \rightarrow +\infty} f(\boldsymbol{\eta}^t) = 0$,这意味着,由式(21)产生的序列 $\{\boldsymbol{\eta}^t\}$ 收敛,且 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \boldsymbol{\eta}^t = \boldsymbol{\eta}^*$. 证毕.

3.3 仿人机器人的偏摆力矩控制体系结构

为保证机器人的稳定步行,需要同时保证水平方向及垂直方向的力矩平衡.为达到此目标,分别设计了ZMP控制器与偏摆力矩控制器,其整体控制框图可描述为如图2所示的双闭环控制结构.其中,ZMP控制器根据规划的ZMP轨迹与实际ZMP轨迹的误差得到腿部各关节的校正量;偏摆力矩控制器根据由各关节实际的角度 q 、角速度 \dot{q} 、角加速度 \ddot{q} 计算得到需抵消的偏摆力矩,并采用本文所提方法计算得到优化后的双臂摆动轨迹 q_a ,再由关节角度自适应跟踪控制器输出驱动力矩 τ 到仿人机器人,控制各关节跟踪期望角度,实际稳定步行.

ZMP控制器及关节角度自适应跟踪控制器的实现可参考文献[18~21].

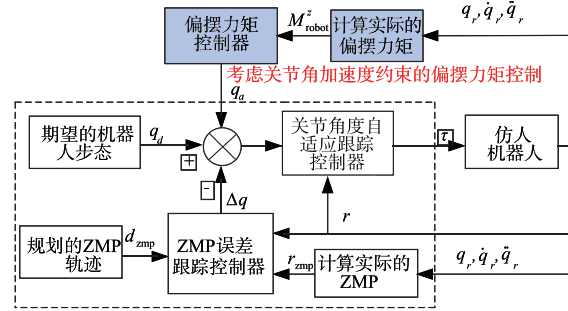


图2 偏摆力矩控制框图

3.4 仿人机器人控制性能指标

为衡量机器人步行过程中的稳定性,分别采用ZMP均方根误差 x_{zmp}^{rmse} 、偏摆力矩均方根误差 M_z^{rmse} 来衡量机器人水平方向及垂直方向的步行稳定程度,其定义如下.

$$x_{zmp}^{rmse} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{zmp}^r(i) - x_{zmp}^d(i))^2}{N}} \quad (30)$$

$$M_z^{rmse} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_z^r(i) - M_z^d(i))^2}{N}} \quad (31)$$

其中, $x_{zmp}^d(i)$ 、 $x_{zmp}^r(i)$ 分别表示第 i 时刻期望的及实际的 x 方向 ZMP 轨迹,理想的 ZMP 位置通常设为足底的中心点位置, $M_z^d(i)$ 、 $M_z^r(i)$ 分别表示第 i 时刻期望的及实际的偏摆力矩大小,且 $M_z^d = 0$, N 是最大的采样数,在实验中每 20ms 采样一次.

4 实验结果及分析

为验证本文所提方法的有效性,搭建了仿人机器人步行控制系统测试环境,如图3所示.整体机器人控制系统包含仿人机器人及上位机控制系统两部分.上位机控制系统运行在地面工作站上,通过高清摄像头识别机器人的位置及目标位置,并采用无线通讯的方式将指令发送给机器人,实现远程控制.机器人上配备有陀螺仪、控制板、电机驱动板、麦克风、扬声器及锂电池等.为降低系统能耗,机器人样机各零部件采用3D打印技术制作而成,全身共有17个自由度,其中,踝关节、髌关节、肩关节分别设有俯仰及横滚两个自由度,膝关节及肘关节各设有一个俯仰自由度,颈部关节配置了一个偏摆自由度,用于头部左右转动.

电机是机器人步行过程中的执行机构,在实际应用中,机器人的整体控制性能总是受电机本身物理约束的限制,例如电机转动最大加速度、最大扭矩等.为验证本文所提控制方案的控制效果,选取四种不同型号的机器人,分别是:自主研发的第二代及第三代 BRZ^[22]

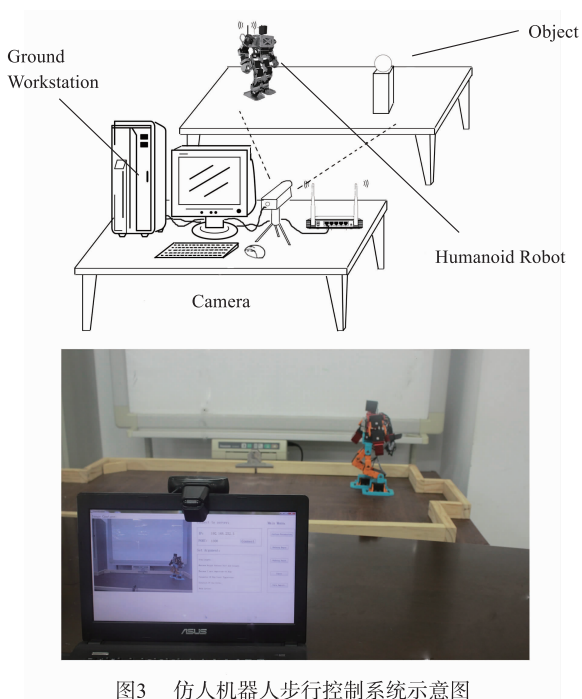


图3 仿人机器人步行控制系统示意图

机器人,日本产业技术综合研究所研制的 HRP-2^[23] 机器人,德国慕尼黑大学研制的 TORO^[24] 机器人. 具体参数如表 1 所示.

表 1 四种不同型号机器人的配置参数

	1号机器人 BRZ-2	2号机器人 BRZ-3	3号机器人 HRP-2	4号机器人 TORO
手臂长度/m	0.139	0.6	0.62	0.65
手臂质量/kg	0.23	2.6	10.2	8.4
电机最大输出力矩/Nm	0.8	4.8	7.4	8.1

由机器人模型及力矩平衡原理,可以计算得到双臂摆动力矩,计算公式如下

$$\tau = \frac{1}{4} m_a \ddot{q}_a (l_a)^2 \quad (32)$$

其中, τ 代表电机输出力矩, \ddot{q}_a 为手臂转动的角加速度, m_a 表示手臂质量, l_a 代表手臂长度.

将表 1 中的数据代入式(32),可计算得到四种型号机器人所采用电机的最大加速度约束,分别为 720rad/s^2 、 20.5rad/s^2 、 7.55rad/s^2 、 9.13rad/s^2 . 由上述计算结果不难看出,机器人的机械结构、电机力矩大小对于电机最大加速度约束影响较大,小尺寸机器人 BRZ-2 由于质量轻,电机最大加速度约束范围较大,而对于全尺寸机器人 HRP-2 和 TORO,电机最大加速度约束范围则较小,这也说明了在大尺寸机器人应用场合,电机最大加速度约束对控制性能的影响更为

明显.

为验证本文方法的有效性,将本文所提方法与文献[14]中的方法进行比较,并将本文所提方法记为方法 1,将文献[14]中的方法记为方法 2. 两种方法分别应用于上述 1 号机器人与 2 号机器人,1 号机器人与 2 号机器人的结构参数如表 2 所示.

表 2 仿人机器人的结构参数

		躯干	大腿	小腿	脚	手臂
1号机器人	质量/kg	0.32	0.19	0.17	0.12	0.23
	长度/cm	11.2	7.5	6.7	5.6	13.9
2号机器人	质量/kg	3.1	2.6	1.5	0.45	2.6
	长度/cm	47.3	31.8	21.6	7.7	60.1

表 2 中,1 号机器人身高 0.34m,质量 1.82kg,2 号机器人身高 1.13m,质量 18.1kg. 在实验过程中,保持实验环境及初始条件的一致,整个步行实验包含 5 个步行周期,每个步行周期持续 1.2s,分别包含有起步步态、周期步行步态、止步步态,每步步距 6cm,机器人在降低重心将身体重心移至左脚,完成起步动作后,左右脚各迈出两步完成两个周期步行步态,最后一个步行周期执行止步步态,恢复各关节初始值. 在实现方法 1 时,将矩阵 \mathbf{Q} 设为单位矩阵,手臂左右关节角初始化为 $q_a(0) = (q_a^l(0), q_a^r(0))^T = (0, 0)^T$,其关节角速度及加速度初始化为 $\dot{q}_a(0) = \ddot{q}_a(0) = (0, 0)^T$. 将方法 1 与方法 2 分别应用于 1 号和 2 号机器人,手臂角加速度 \ddot{q}_a 轨迹比较图如图 4、图 5 所示.

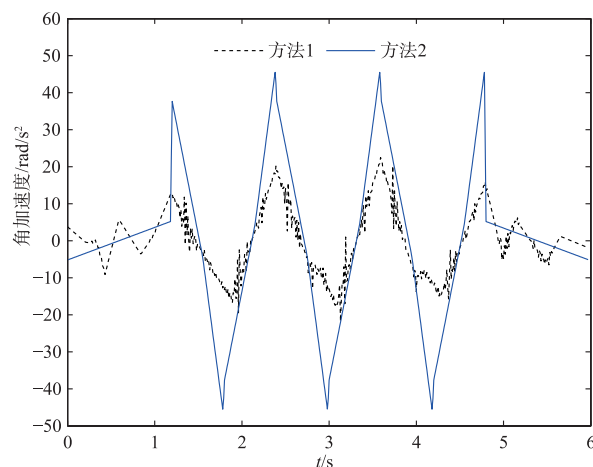


图4 两种方法应用于1号机器人的角加速度轨迹比较

在图 4、图 5 中,黑色点线与蓝色实线分别代表采用方法 1 及方法 2 所对应的角加速度轨迹. 由图 4 可知,相对于方法 2,方法 1 所需的角加速度峰值减少了将近 50.5%,这说明本文方法具有更好的能量效率. 由图 5 可知,对于 2 号机器人,由于机器人本身质量较大以及电机自身物理特性的限制,采用方法 2 所产生的手

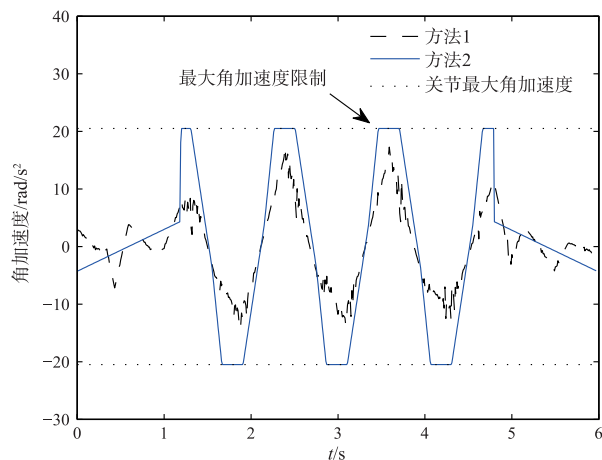


图5 两种方法应用于2号机器人的角加速度轨迹比较

臂角加速度轨迹在[1.20s 1.30s]、[1.67s 1.90s]、[2.27s 2.50s]、[2.87s 3.10s]、[3.47s 3.70s]、[4.07 4.30]、[4.67 4.79]等时段出现了“削峰”现象,导致手臂转动角度不能达到预期角度,进而影响控制性能,而方法1有效避免了“削峰”现象。

为评估本文方法的偏摆力矩控制效果以及步行稳定性,基于图3所示的仿人机器人控制系统进行了步行实验.步行过程中的偏摆力矩轨迹如图6所示.其中,黑色点划线代表控制前的偏摆力矩大小,黑色点线表示应用方法1控制后的偏摆力矩大小,蓝色实线代表采用方法2控制后的偏摆力矩大小,黑色虚线则表示最大摩擦力矩.如图6所示,未采用控制方法前,偏摆力矩在1.33s、1.93s、2.53s、3.13s、3.73s、4.33s等时刻出现尖峰,并超出最大静摩擦力矩,如果不加以控制,机器人将偏离预期轨迹,甚至会发生侧滑或摔倒.采用方法1及方法2进行控制后,偏摆力矩均控制在安全范围内,有效抵消了偏摆力矩的影响,其偏摆力矩均方根误差如表3所示.

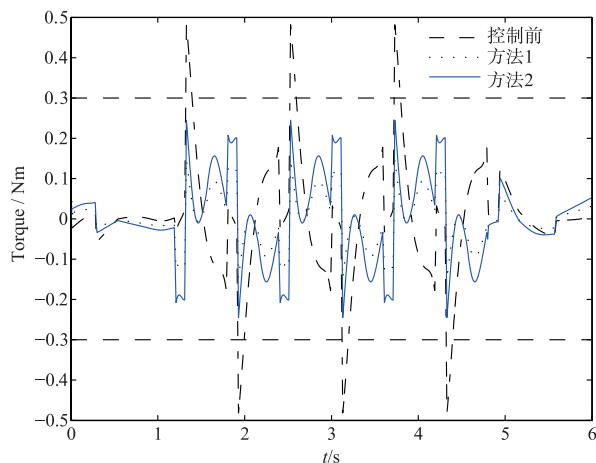


图6 偏摆力矩比较图

表3 采用两种方法的偏摆力矩用 ZMP 均方根误差

	方法1	方法2
偏摆力矩均方根误差 M_z^{mse}	0.0808	0.1013
ZMP 均方根误差 $x_{\text{zmp}}^{\text{mse}}$	0.0139	0.0149

图7为ZMP轨迹比较图,其中,黑色实线表示x方向的ZMP稳定区域,黑色点线与蓝色实线分别表示采用方法1及方法2控制后的x方向ZMP轨迹.如图7所示,方法1与方法2均能够保证机器人水平方向的平衡,其ZMP均方根误差如表3所示.

由表3中的数据可知,相对于方法2,采用方法1所产生的偏摆力矩均方根误差下降率约20.2%左右.

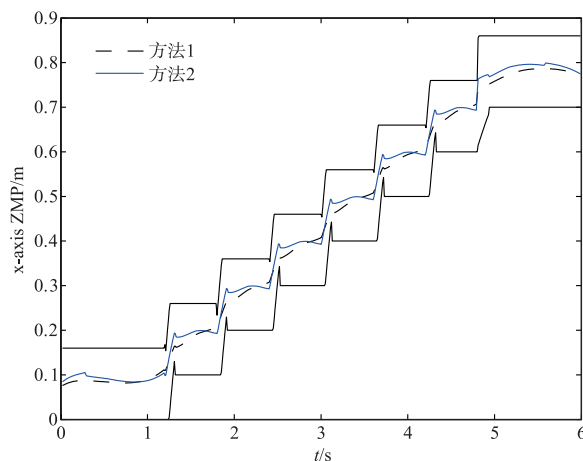


图7 ZMP轨迹比较图

5 总结

本文提出了一种考虑关节角加速度约束的偏摆力矩控制方法,该方法采用双臂摆动的方式克服偏摆力矩对稳定性的影响.为避免因电机自身物理限制造成的“削峰”现象,以手臂摆动角加速度最小为优化目标,建立优化方程,并提出了一种基于变分不等式的变步长在线迭代算法得到优化后的双臂摆动轨迹,实验及仿真结果表明该方法可有效避免“削峰”现象,能有效克服偏摆力矩的影响.

参考文献

- [1] 曹政才,赵应涛,付宜利.车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J].电子学报,2012,40(4):632-635.
CAO Zheng-cai, ZHAO Ying-tao, FU Yi-li. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4):632-635. (in Chinese)
- [2] 王保防,张瑞雷,郭健,等.纵向打滑状态下的轮式移动机器人编队控制[J].电子学报,2017,45(1):206-212.
WANG Bao-fang, ZHANG Rui-lei, GUO Jian, et al. Formation control for car-like mobile robots under slip conditions

- [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(1): 206 – 212. (in Chinese)
- [3] YANG L, LIU Z, ZHANG Y. Online walking control system for biped robot with optimized learning mechanism: an experimental study[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86(3): 2035 – 2047.
- [4] PIAO S, ZHONG Q, LIU Y. The research of optimal motion planning for robot in complex environment[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2011, 20(4): 637 – 640.
- [5] 钟秋波, 朴松昊, 杨滨. 基于参数优化的类机器人运动规划研究[J]. *电子学报*, 2012, 40(6): 1154 – 1158.
ZHONG Qiu-bo, PIAO Song-hao, YANG Bin. Research of motion control for humanoid robot based on parametric optimum[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1154 – 1158. (in Chinese)
- [6] LEE B J, STONIER D, KIM Y D, et al. Modifiable walking pattern of a humanoid robot by using allowable ZMP variation[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(4): 917 – 925.
- [7] 李建, 陈卫东, 王丽军, 等. 未知不平整地面上的双足步行稳定控制[J]. *电子学报*, 2010, 38(11): 2669 – 2674.
LI Jian, CHEN Wei-dong, WANG Li-jun, et al. Stability control for biped walking on unknown rough surface[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(11): 2669 – 2674. (in Chinese)
- [8] ZHU C, Tomizawa Y, LUO X, et al. Biped walking with variable ZMP, frictional constraint, and inverted pendulum model[A]. *Proceeding of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]*. China: IEEE, 2004. 425 – 430.
- [9] ERBATUR K, KURT O. Natural ZMP trajectories for biped robot reference generation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 835 – 845.
- [10] LIU Z, WANG L, CHEN C, et al. Energy-efficiency-based gait control system architecture and algorithm for biped robots[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (Part C: Applications and Reviews)*, 2012, 42(6): 926 – 933.
- [11] 蔚伟, 包钢, 王祖温, 等. 基于腰关节力矩补偿的仿人机器人快速步行模式生成[J]. *机器人*, 2010, 32(2): 219 – 225.
YU W, BAO G, WANG Z-W, et al. Fast walking pattern generation for humanoid robot using waist joint moment compensation[J]. *Robot*, 2010, 32(2): 219 – 225. (in Chinese)
- [12] UGURLU B, SAGLIA J A, TSAGARAKIS N G, et al. Yaw moment compensation for bipedal robots via intrinsic angular momentum constraint[J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2012, 9(04): 1250033. 1 – 1250033. 27.
- [13] XING D P, SU J B. Arm/trunk motion generation for humanoid robot[J]. *Science in China (Series F: Information Sciences)*, 2010, 53(8): 1603 – 1612.
- [14] 付根平, 陈建平, 杨宜民. 基于双臂摆动的仿人机器人偏摆力矩矫正方法[J]. *机器人*, 2012, 34(4): 498 – 504.
FU G-P, CHEN J-P, YANG Y-M. A yaw moment counteracting method for humanoid robot based on arms swinging[J]. *Robot*, 2012, 34(4): 498 – 504. (in Chinese)
- [15] HE B. A new method for a class of linear variational inequalities[J]. *Mathematical Programming*, 1994, 66(1 – 3): 137 – 144.
- [16] ZHANG Y, GE S S, Lee T H. A unified quadratic-programming-based dynamical system approach to joint torque optimization of physically constrained redundant manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (Part B: Cybernetics)*, 2004, 34(5): 2126 – 2132.
- [17] ZHANG Y, WU H, ZHANG Z, et al. Acceleration-level repetitive motion planning of redundant planar robots solved by a simplified LVI-based primal-dual neural network[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(2): 328 – 343.
- [18] 付根平, 杨宜民, 陈建平, 等. 基于 ZMP 误差校正的仿人机器人步行控制[J]. *机器人*, 2013, 35(1): 39 – 44.
FU G-P, YANG Y-M, CHEN J-P, et al. Walking control for humanoid robot based on ZMP error correction[J]. *Robot*, 2013, 35(1): 39 – 44. (in Chinese)
- [19] 杨亮, 傅瑜, 何怀文. 基于腿部关节控制的仿人机器人偏摆力矩控制方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(1): 79 – 83.
YANG L, FU Y, HE H-W. A yaw moment control method for humanoid robot based on leg joints control[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 78 – 83. (in Chinese)
- [20] CHEN C, WEN C, LIU Z, et al. Adaptive asymptotic control of multivariable systems based on a one-parameter estimation approach[J]. *Automatica*, 2017, 83: 124 – 132.
- [21] YANG C, JIANG Y, HE W, et al. Adaptive parameter estimation and control design for robot manipulators with finite-time convergence[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(10): 8112 – 8123.
- [22] YANG L, LIU Z, ZHANG Y. Online walking control system for biped robot with optimized learning mechanism: an experimental study[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86(3): 2035 – 2047.
- [23] KANEHIRA N, KAWASAKI T U, OHTA S, et al. Design and experiments of advanced leg module (HRP-2L) for humanoid robot (HRP-2) development[A]. *Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Switzerland [C]*. US: IEEE, 2002. 2455 – 2460.

[24] HU K, OTT C, LEE D. Learning and generalization of compensative zero-moment point trajectory for biped

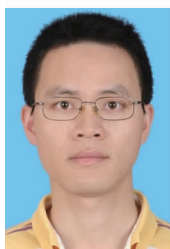
walking [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32 (3): 717 - 725.

作者简介



杨亮(通讯作者) 男,1980年8月出生,江西婺源人.工学博士,副教授.现为中山市产业技术研究院副院长,主要从事智能机器人系统及技术方面的相关研究.

E-mail: alex_yangliang@foxmail.com



付根平 男,1984年1月出生,江西新余人.工学博士.主要从事仿人机器人技术及其应用方面的相关研究.

陈勇 男,1977年1月出生,四川内江人.工学博士,教授,博士生导师. IEEE Senior Member,中国电机工程学会会员,中国自动化学会会员,中国电源学会会员.主要从事先进控制技术、电力电子等方面的相关研究.