

基于线性耦合振荡器模型的仿人机器人步态规划算法

汪柳青, 尚伟伟

(中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230027)

摘要:在采用线性耦合振荡器模型的仿人机器人步态规划中, 振荡器部分参数依靠手动调整难以获得能稳定行走的值, 故提出了一种优化振荡器参数的算法以改善整个步态规划方法. 将机器人的步行速度、行走过程中的质心振动幅度和 ZMP(zero moment point) 曲线的回绕率组合起来作为优化目标, 定义并选定 ZMP 稳定裕度为约束条件, 采用带约束的非线性优化方法作为求解工具, 在部分参数固定的情况下, 计算得到线性耦合振荡器部分参数的最优值. 仿真结果表明, 优化方法选择的参数能在保证较大 ZMP 稳定裕度的情况下实现机器人的快速步行. 在 DARwIn-OP 仿人机器人开放平台上进行的步态规划实验结果表明, 优化得到的线性耦合振荡器参数能保证仿人机器人以较大速度稳定行走.

关键词:仿人机器人; 步态规划; 参数优化; DARwIn-OP

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.10.001

引用格式: Wang Liuqing, Shang Weiwei. A gait pattern planning algorithm based on linear coupled oscillator model for humanoid robots[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(10):795-803.

汪柳青, 尚伟伟. 基于线性耦合振荡器模型的仿人机器人步态规划算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(10):795-803.

A gait pattern planning algorithm based on linear coupled oscillator model for humanoid robots

WANG Liuqing, SHANG Weiwei

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: For the gait pattern planning algorithm of humanoid robots with the linear coupled oscillator model, some oscillator parameters were chosen by manual adjustment, which makes it difficult to get the parameters' values that could ensure stable walking. To reduce the time of parameter selection and simplify the gait planning algorithm, a parameter selection algorithm based on linear coupled model for humanoid robots was proposed. By combining the walking speed, oscillation amplitude of the mass center during walking, and the trajectory curvature of ZMP, the optimization goal was established. The stable margin was defined and chosen as a constraint condition, and the nonlinear constraint method was used to obtain the optimization parameters which could ensure stable walking at faster speed. Simulation experiment demonstrated that the optimization parameters could ensure stable walking with rich stable margin. The proposed method was

收稿日期:2013-12-17; 修回日期:2014-03-06

基金项目:国家自然科学基金(51275500)资助.

作者简介:汪柳青,女,1988年生,硕士生. 研究方向:仿人机器人. E-mail: wanglq@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:尚伟伟,博士/副教授. E-mail: wwshang@ustc.edu.cn

implemented on the open humanoid platform DARwIn-OP, and the results indicate that the optimized parameters in the linear coupled oscillator can achieve stable walking with fast gait pattern generation.

Key words: humanoid robot; gait pattern planning; parameter optimization; DARwIn-OP

0 引言

仿人机器人(humanoid robot)是一种外形类人的机器人. 1973年,早稻田大学加藤一郎研究室开发出世界上第一台仿人机器人 WABOT-1^[1]. 近年来,仿人机器人已经取得了巨大进步,其中主要的研究成果之一是 Honda 的 ASIMO^[2]. “仿人”是为了使机器人能够更好地在人类的生活环境中服务人类,仿人机器人应当具有的最大特征之一是双足步行功能,类人的双足运动平衡与控制能力是实现各种其他功能的基础. 不同于小车类轮式移动机器人或多足机器人,仿人机器人由于其自身的重心较高、脚底支撑面相对较小而较易摔倒,因此步态规划中除了规划基本的多连杆关节运动,还必须考虑步行稳定性.

1972年, Vukobratovic 等提出了零力矩点(zero moment point, ZMP)的概念^[3],其后出现了许多基于动力学分析的步态规划方法^[4-6]. 这些方法的计算量较大,为此, Kajita 等提出了线性倒立摆模型^[4],引入预测控制来补偿简化动力学模型与实际多连杆模型之间的误差^[7]. 受仿生学的中心模式发生器(central pattern generator, CPG)启发^[8],一些研究人员提出基于仿生学的步态方法^[9-11]. CPG 模型中大量参数的物理含义并不十分明确,难以确定取值,所以 CPG 模型难以直接应用于仿人机器人. Endo 等简化了 CPG 模型,利用参数较少的振荡器来规划仿人机器人的步态^[9-10]; Ha 等提出线性耦合振荡器(linear coupled oscillator)模型,将其应用于小型仿人机器人^[11]. 对于总高度不足半米的小型仿人机器人,受硬件体积的限制,其能承受的计算代价有限, Ha 等提出的线性耦合振荡器模型具有计算简便的优势. 现在常用的机器人步行稳定性判据为 ZMP 稳定判据. ZMP 稳定判据为:如果机器人各关节的运动轨迹所对应的 ZMP 都在支撑凸多边形内部(不包括边界),那么机器人的支撑脚在单腿支撑期就会与地面保持相对静止,不会出现欠驱动的翻转自由度,进而可以使用关节轨迹跟踪的方法来控制双足机器人稳定行走^[2].

由于线性耦合振荡器模型中的参数与 ZMP 轨

迹之间没有直接的物理关联,只能依靠多次实验调试来选择 ZMP 稳定的耦合振荡器参数,进而保证仿人机器人的稳定行走. 为了实现机器人的步行要进行步态规划,保证步行的稳定性是步态规划的前提. 针对线性耦合振荡器部分参数难以选择的问题,通过离线试凑,可以将线性耦合振荡器参数的选择转化为优化求解问题,因此在设计出基于线性耦合振荡器步态规划算法的基础上,提出线性耦合振荡器参数优化方法. 以步行速度、步行中机器人的振动幅度和 ZMP 曲线回绕程度为性能指标,步行稳定性作为约束条件,利用带约束的非线性优化方法进行求解. 经仿真实验和 DARwIn-OP 仿人机器人平台上的行走实验验证,本论文提出的参数优化方法选择出的参数,使得行走稳定性和速度得到显著提高.

1 基于线性耦合振荡器模型的步态规划方法

本节首先介绍步态规划的基本原理和线性耦合振荡器模型,在此基础上给出基于线性耦合振荡器模型的步态规划算法. 对人类的步行运动进行分析,定义一个完整的步行周期包括“双脚支撑-单脚支撑-双脚支撑-单脚支撑(交换支撑脚)-双脚支撑”五个阶段. 在整个步行周期中,质心都在运动,左右脚交替运动. 一个完整的步行周期中落脚点和质心运动轨迹在地面上投影(先右脚向前一步,然后左脚向前一步)示意图如图 1 所示. 初始时刻,右脚位于点 R_1 处,左脚位于点 L_1 处,质心位于点 C_1 处,双脚均保持不动,设右脚先开始移动. 由图 1 可见,质心在整个运动周期中一直是按照相同的运动规律在运动,而脚步的运动规律则是随时间段不同而不同.

仿人机器人是一个重心较高、支撑点较小的系统,可以将它抽象为一个三维倒立摆. 先确定出一个步行周期中脚与质心的相对位置变化规律,再通过逆运动学求解一个完整的步行周期中各关节的“时间-位置”序列,将位置信息作为机器人各关节电机的输入信号,控制机器人实现向前踏步的动作. 重复这种向前踏步的动作,便可以实现机器人连续向前行走. 通过人类行走实验发现,在正常行走过程中,

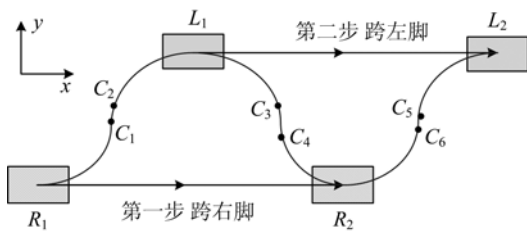


图 1 一个完整步行周期中落脚点 and 质心轨迹的地面投影
 Fig. 1 The projection of mass center and foothold during a whole walking cycle

人体髋关节和质心运动轨迹均接近正弦波动曲线；在不同负重及速度状态下没有明显差异，人体步行平衡是一种动态的振荡性平衡^[12]。如果需要转弯，按照机器人的期望路线，在机器人的髋部偏摆关节加上相应的转角序列就可以实现机器人走任意形状的路线。

振荡器生成一系列周期信号，用正弦函数表示是一种常用的方法^[10]。控制关节按照这种周期信号运动使得机器人交替向前运动。耦合振荡器模型由运动振荡器和平衡振荡器两部分叠加表示。运动振荡器描述机器人的脚相对质心的位置变化规律，平衡振荡器描述质心在一个步行周期内的位置变化规律。文献[11]给出了仿人机器人的线性耦合振荡器模型：

$$y_s(t) = y_b(t) + y_m(t) \quad (1)$$

式中， y_s 表示仿人机器人的脚相对质心的总运动轨迹， y_b 表示平衡振荡器的输出， y_m 表示运动振荡器的输出，其定义为：

$$y_b(t) = \rho_b \sin(\omega_b t + \Delta_b) + \mu_b \quad (2)$$

$$y_m(t) = \begin{cases} \rho_m, & [0, rT_s/4) \\ \rho_m \sin(\omega_m t + \Delta_m), & [rT_s/4, T_s/2 - rT_s/4) \\ -\rho_m, & [T_s/2 - rT_s/4, T_s/2 + rT_s/4) \\ \rho_m \sin(\omega_m(t - r\pi/2) + \Delta_m), & [T_s/2 + rT_s/4, T_s - rT_s/4) \\ \rho_m, & [T_s - rT_s/4, T_s) \end{cases} \quad (3)$$

式中， ρ_m 和 ρ_b 分别表示运动振荡器和平衡振荡器的幅值， ω_m 和 ω_b 分别表示运动振荡器和平衡振荡器的频率， Δ_m 和 Δ_b 分别表示运动振荡器和平衡振荡器的初相； μ_b 为平衡振荡器的偏移量； T_s 为步行周期， r 表示双脚支撑时间在总的步行周期中所占比例。式(3)的五个时间段分别对应一个完整步行周期

中的五个阶段。式(1)~(3)确定了一个步行周期中脚与质心之间的相对运动规律。由式(1)~(3)可见，振荡器模型中需要确定的参数共有九个。

利用上述式(1)~(3)，可以确定在一个步行周期中脚与质心之间的相对位置变化规律。设定双脚在世界坐标系中的起始位置，根据每个时间段的左右脚运动规律求出每个采样时刻 t 质心的位置 $c(t)$ 、左脚的位置 $l(t)$ 及右脚的位置 $r(t)$ 分别为：

$$r(t) = \begin{cases} l(t) - y_s(t), & t \in [rT_s/4, T_s/2 - rT_s/4] \\ r(t - \Delta t), & t \notin [rT_s/4, T_s/2 - rT_s/4] \end{cases} \quad (4)$$

$$l(t) = \begin{cases} c(t) + y_s(t), & t \in [T_s/2 + rT_s/4, T_s - rT_s/4] \\ l(t - \Delta t), & t \notin [T_s/2 + rT_s/4, T_s - rT_s/4] \end{cases} \quad (5)$$

$$c(t) = \begin{cases} l(t) - y_s(t), & t \in [0, T_s/2 - rT_s/4] \\ r(t) - y_s(t), & t \notin [T_s/2 - rT_s/4, T_s] \end{cases} \quad (6)$$

式中， Δt 为采样时间间隔。由式(4)~(5)，仿人机器人步行各阶段左右脚及质心在世界坐标系中的位置如式(7a)~(7e)：

$$j = 1: r_1 = r_0, l_1 = l_0, c_1 = l_1 - y_t \quad (7a)$$

$$j = 2: l_2 = l_1, c_2 = l_2 - y_t, r_2 = c_2 + y_t \quad (7b)$$

$$j = 3: r_3 = r_2, l_3 = l_2, c_3 = r_3 - y_t \quad (7c)$$

$$j = 4: r_4 = r_3, c_4 = r_4 - y_t, l_4 = c_4 + y_t \quad (7d)$$

$$j = 5: l_5 = l_4, r_5 = r_4, c_5 = l_5 - y_t \quad (7e)$$

式中， l_0 和 r_0 分别表示初始时刻左脚和右脚的在世界坐标系中的位置； j 对应式(3)的五个时间段编号。 c_j 表示质心在世界坐标系中的位置， r_j 表示右脚在世界坐标系中的位置， l_j 表示左脚在世界坐标系中的位置。根据上述公式(7a)~(7e)，设计基于振荡器模型的步态规划算法描述如下：

Step 1 选取合适的振荡器参数 r, T_s, ρ_m 等，确定左右脚的初始位置 l_0 和 r_0 (假设步行周期为 T_s ，采样时间间隔为 Δt)；

Step 2 令初始时刻 t 的初始值为 0，总的采样时间为 T ；

Step 3 根据式(1)~(3)计算 y_t ，判断 t 属于步行周期中的哪个时间段 j ，对应式(7a)~(7e)计算右脚位置 r_j 、左脚位置 l_j 及质心位置 c_j 。

Step 4 根据右脚位置 r_j 、左脚位置 l_j 及质心位置 c_j ，进行逆运动学求解机器人各关节角，用于对

电机进行位置控制。

Step 5 $t = t + \Delta t$, 若 $t \leq T$ 则返回 Step 3; 否则, 计算结束。

2 振荡器参数的优化

2.1 参数优化问题的提出和算法

计算出振荡器模型与机器人行走过程中质心和脚步轨迹的换算关系如式(1)~(3), 利用上节所提出步态规划算法进行步态规划时, 式(1)~(3)中共有九个参数待确定。其中不同的参数取值会直接影响到规划的质心位置和左右脚步位置 c_j, l_j, r_j 。本文将连接仿人机器人关节之间的构件称为连杆, 并且给每个连杆分配一个旋转自由度。质心位置和左右脚步位置 c_j, l_j, r_j 会影响到机器人身上的连杆位置 (x_i, y_i, z_i) 和加速度 $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$, 从而会影响到机器人行走过程中 ZMP 曲线的形状——不是任意规划出的质心和脚步轨迹都能保证 ZMP 在稳定域内。ZMP 的计算公式如下:

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \{ (\ddot{z}_i + g) x_i - \ddot{x}_i z_i \}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (8)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \{ (\ddot{z}_i + g) y_i - \ddot{y}_i z_i \}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (9)$$

式中, n 表示机器人连杆的个数, m_i 表示第 i 号连杆的质量, (x_i, y_i, z_i) 表示第 i 号连杆的在世界坐标系中的位置, $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$ 分别表示第 i 号连杆的加速度, (x_{ZMP}, y_{ZMP}) 表示求出的 ZMP 在世界坐标系下的位置坐标。

为了选择振荡器参数, 首先对振荡器模型中的参数及其物理意义进行分析。振荡器模型表达式中共有九个参数: $\rho_m, \rho_b, \omega_m, \omega_b, \Delta_m, \Delta_b, \mu_b, r, T_s$ 。其中, r 为双脚支撑时间占整个步行周期中的比例, 研究表明, 正常人的双脚支撑比约为 28%^[12]。根据实际情况也可以确定, 正常步行中的双脚支撑比不会超过 30%; 相反, 在机器人的步行中, 由于机器不用考虑肌肉疲劳, 单脚支撑比下限可以达到 10%, 某些特殊机器人可能会更低。 T_s 为步行周期, 在机器人性能允许的范围, 由具体任务给定。在机器人步幅给定的情况下, 周期越小, 平均速度越大; 周期越大, 平均速度越小。周期确定以后, 频率 ω_m, ω_b 也随之唯一确定。相位 Δ_m, Δ_b 和偏移量 μ_b 可以由初始时刻

左右脚的相对位置计算得到。 ρ_m, ρ_b 与质心、脚步轨迹的振荡幅值相关, 也与机器人步行的速度相关(定义机器人的平均步行速度为“步长/周期”, 步长为机器人左脚或右脚跨过的距离)。 ρ_m 越大, 步行速度越快, 但也可能导致 ZMP 曲线超出了 ZMP 稳定区域。

由上面的分析可见, $\omega_m, \omega_b, \Delta_m, \Delta_b, \mu_b, r, T_s$ 七个参数可以由客观条件和任务要求确定, 需要考虑选择的就只剩下 ρ_m, ρ_b 两个参数。 ρ_m, ρ_b 都是三维向量, 令 ρ_m 的 x, y, z 分量分别表示为 $\rho_m^i (i=1, 2, 3)$, ρ_b 也采用相同的表示方法。由于沿 x 轴前进时, 脚步的轨迹在 y 轴方向上没有变化, 即 $\rho_m^2 = 0; \rho_b^2$ 表示抬脚高度也需与腿长成一定比例, 经计算发现, 在合理的变化范围内, ρ_m^3 的数值对 ZMP 曲线(即稳定性)的影响很小; ρ_b^3 表示行走过程中机器人质心在 Z 轴上最大最小高度之差, 由实际情况可知该值大约为机器人身高的 1%, 根据机器人的实际尺寸可以确定一个合理的值。无法确定的就只有 $\rho_m^1, \rho_b^1, \rho_b^2$ 。这三个值会直接影响到质心和脚步的轨迹, 选择不合理就会导致 ZMP 曲线超出稳定范围、机器人无法稳定行走。由于 $\rho_b^1 / \rho_m^1 \leq 1$ 始终成立, 令 $q = \rho_b^1 / \rho_m^1$ 。为了较简便地找到合适的幅值参数, 设计一个离线优化算法来取得满足 ZMP 稳定性的参数。

设计优化算法的目标是为了得到稳定的步行参数, 为了实现不同速度要求下的稳定行走, 将速度作为优化目标, 稳定性作为约束条件; 在优化的过程中发现, 当速度大到一定程度时, ZMP 曲线会出现回绕现象, 质心轨迹会出现不平滑点, 这也是不希望出现的, 所以将 ZMP 曲线的回绕率也考虑在优化目标内; 最后, 机器人在行走的过程中晃动幅度不能太大, 将机器人的晃动幅度也包括在优化目标内。综上所述, 给出优化表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(x_1, x_2, x_3) = & \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{10} \text{ZMP}(nT_s/2 + i \cdot \Delta t) + \\ & x_1 \cdot x_2 + x_3 + 4x_1/T_s, \\ & 10 \leq x_1 \leq 70 \\ & 0 \leq x_2 \leq 0.4 \\ \text{subject to } & 22 \leq x_3 \leq 45 \end{aligned} \quad (10)$$

待优化参数: $x_1 = \rho_m^1, x_2 = \rho_b^1 / \rho_m^1, x_3 = \rho_b^2$ 。

优化目标: 在周期 T_s 、单双脚支撑比 r 等参数

不变且满足 ZMP 稳定性的前提下,找到合适的振荡器幅值 ρ_m, ρ_b ,极大化步行速度.这里的步行速度用单位时间内质心移动的距离来表示,由仿真观察得,在一个步行周期中,质心移动过的距离大小等于 $4\rho_m/T_s$;质心移动的平均速度可以用步幅/周期来表示,即 $4\rho_m/T_s$.除此之外,还希望行走过程中质心不要出现过大的抖动.将振荡器幅值求和,度量质心的抖动情况,表示为 $x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{10} ZMP(nT_s/2 + i \cdot \Delta t)$ 函数度量 ZMP 曲线的回绕程度.通过实际行走曲线分析发现,当 ZMP 曲线回绕度过大时,质心运动轨迹就会出现不平滑现象,所以一般希望回绕度不要太大.

约束条件:要使步态规划有效,还必须满足稳定性约束.采用 ZMP 稳定判据作为稳定与否的判断条件.用“稳定裕度”来刻划稳定性的大小,定义为单腿支撑期 ZMP 轨迹到支撑多边形的中心点的距离对时间的积分.具体计算方法为,ZMP 曲线上单脚支撑时期的采样点与稳定域的中心点之间的距离 $\|ZMP(t) - c(t)\|$ 乘以奖惩系数 ω 对时间积分的值,即 $\int_0^T \omega \cdot \|ZMP(t) - c(t)\| dt$.奖惩系数 ω 的选择如下:

$$\omega = \begin{cases} 1000, & \begin{bmatrix} 0.04165 \\ 0.025 \end{bmatrix} \leq ZMP(t) - c(t) \\ 1, & \begin{bmatrix} 0.039 \\ 0.022 \end{bmatrix} \leq ZMP(t) - c(t) \leq \begin{bmatrix} 0.04165 \\ 0.025 \end{bmatrix} \\ 0.1, & ZMP(t) - c(t) \leq \begin{bmatrix} 0.039 \\ 0.022 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 仿真实验

为了验证上述步态规划算法和优化方法的有效性,以 DARwIn-OP 机器人为仿真模型. DARwIn-OP 机器人全身共 20 个自由度,其中每条腿配有 6 个自由度,每只手臂配有 3 个自由度,头部两个自由度.其中,腿部关节自由度包括:踝关节俯仰(pitch)及横滚(roll),膝关节俯仰,髌关节俯仰、横滚及偏转(yaw);手臂关节自由度包括:肩关节俯仰及横滚,肘关节俯仰.各关节连杆的详细参数信息见文献[11].

在 Matlab 环境下进行上述优化算法求解仿真试验,计算机处理器是英特尔 Core i3-2120 双核,主频 3.30 GHz,内存 4 GB.从方法上讲,仿真试验主

要实现了本文提出的两个算法,即基于振荡器的步态规划算法和离线参数选择算法;从实验内容上讲,主要进行两组实验:①将行走速度作为未知条件进行优化求解;②将行走速度作为已知条件进行优化求解.前者主要想求解一组速度和稳定都较好的振荡器参数,后者主要用于与文献[11]中的参数作对比,说明在同样的速度下,上述方法能得到稳定性更好的参数.

还重复实现了文献[11]中的振荡器参数,并且将文献[11]中给出的参数与本文所提出的优化方法求出的参数进行了对比.采用 Matlab 优化工具箱中的带约束的非线性优化方法 fmincon 函数求解上述问题.求解时将三个待优化变量 $\rho_m^1, \rho_b^1/\rho_m^1, \rho_b^2$ 的初始值依次设为 30, 0.1, 22, 参数的取值范围设为 [10, 55], [0, 0.5], [20, 45], 其他条件采用 fmincon 函数默认值.周期 T_s 取 1.2 s, 采样时间间隔 Δt 取 0.01 s, 总的采样时间 T 取为 10 s, 双脚支撑时间长度占步行周期时间的比例 r 取为 0.25, 可以事先确定的三个幅值 $\rho_m^2, \rho_m^3, \rho_b^3$ 依次取值为 0, 30.00, 3; 平衡振荡器的频率 ω_b , 运动振荡器的频率 ω_m , 运动振荡器的相位 Δ_m , 平衡振荡器的相位 Δ_b , 以及偏移量 μ_b 分别取值如下:

$$\begin{aligned} \omega_b &= [4\pi/T_s, 2\pi/T_s, 4\pi/T_s], \\ \omega_m &= [2\pi/(1-r)T_s, 2\pi/(1-r)T_s, 2\pi/(1-r)T_s], \\ \Delta_m &= [-r\pi/2(1-r), -r\pi/2(1-r), -r\pi/2(1-r)], \\ \Delta_b &= [0, 0, -\pi/2], \mu_b = 0. \end{aligned}$$

左右脚的初始位置分别设为 $[\rho_m^1, 0, 0], [-\rho_m^1, 0, 0]$, 即左脚在前,右脚在后,对应图 2 中的落脚点位置.另外左右脚的 ρ_m^1 也稍有差异,左脚的为 ρ_m^1 右脚为 $-\rho_m^1$;左脚的 $\Delta_m = \Delta_{m0} + [-\pi/2, 0, 0]$, 右脚的 $\Delta_m = \Delta_{m0} + [\pi/2, 0, 0]$.

第一组实验求得的仿真结果见表 1, ZMP 与质心轨迹如图 2 所示.图 2 中大矩形代表机器人脚底板与地面的接触的面积,大矩形中的小矩形代表保守的 ZMP 稳定域.曲线 II 为求出的 ZMP 轨迹,曲线 I 为质心的运动轨迹.对比图 2(a)与图 2(b)以及表 1 中数据可知,两组参数均能保证 ZMP 落在稳定范围内,但是前者的步行速度明显比后者要快,并且稳定裕度更高.

第二组实验求得的仿真结果见表 2, ZMP 与质心轨迹如图 3 所示.对比图 3(a)与图 3(b)以及表 2 中数据可知,两组参数均能保证 ZMP 落在稳定范

表 1 两种不同方法得到的目标函数、稳定裕度以及步行速度

Tab. 1 The object function, stability and walking speed from two different methods

参数来源	待优化参数取值	目标函数值	稳定裕度值	步行速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
fmincon 函数求解结果	(50,0.459 9,22)	-266.671 7	29.289 3	0.166 2
文献[11]中参数	(30,0.35,20)	-214.500 0	23.883 9	0.100 0

表 2 相同速度下两种不同方法得到的目标函数值、稳定裕度

Tab. 2 The object function and stability from two different methods in the same walking speed

参数来源	待优化参数取值	目标函数值	稳定裕度值	步行速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
fmincon 函数求解结果	(30,0.24,22)	-215.749 0	195.488 7	0.100 0
文献[11]中参数	(30,0.35,20)	-214.500 0	23.883 9	0.100 0

围内,在步行速度相同的情况下,前者的 ZMP 曲线更平滑,稳定裕度显著提高.

第三组实验求得的仿真结果见表 3,ZMP 与质心轨迹如图 4 所示.对比图 4(a)与图 4(b)及表 3 中的数据可知,两组数据均能保证 ZMP 落在稳定范围内,在相同的稳定裕度时前者的步行速度明显要快于后者.

表 3 相同稳定裕度下两种不同方法得到的目标函数值、步行速度

Tab. 3 The object function and walking speed from two different methods in the same stability

参数来源	待优化参数取值	目标函数值	稳定裕度值	步行速度/ ($m \cdot s^{-1}$)
fmincon 函数求解结果	(40,0.40,26.57)	-285.406 7	24.233 1	0.133 3
文献[11]中参数	(30,0.35,20)	-214.500 0	23.883 9	0.100 0

上述仿真实验求解分别从不限速度不限稳定性、限定速度不限稳定性以及不限速度限定稳定性

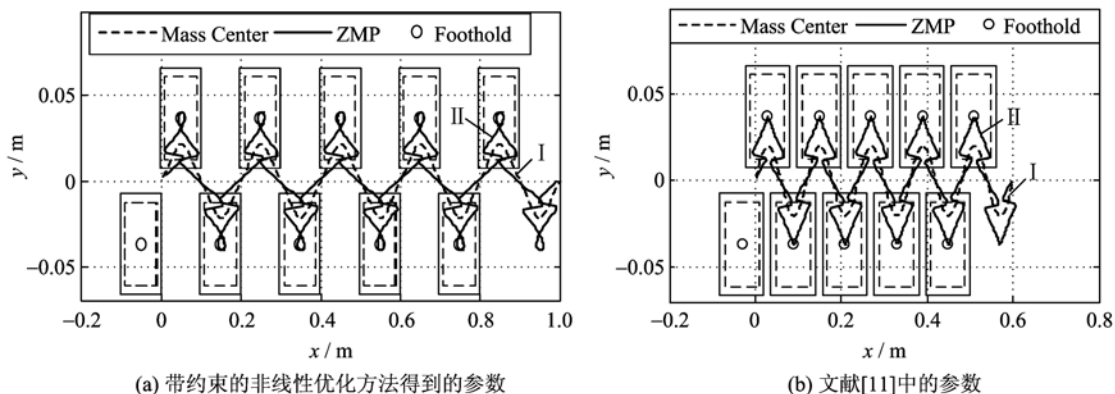


图 2 6 s 内两组不同参数下得到的 ZMP 轨迹与质心轨迹在地面上投影

Fig. 2 The ZMP trajectory and projection of Mass Center from two different groups of parameters during 6 s

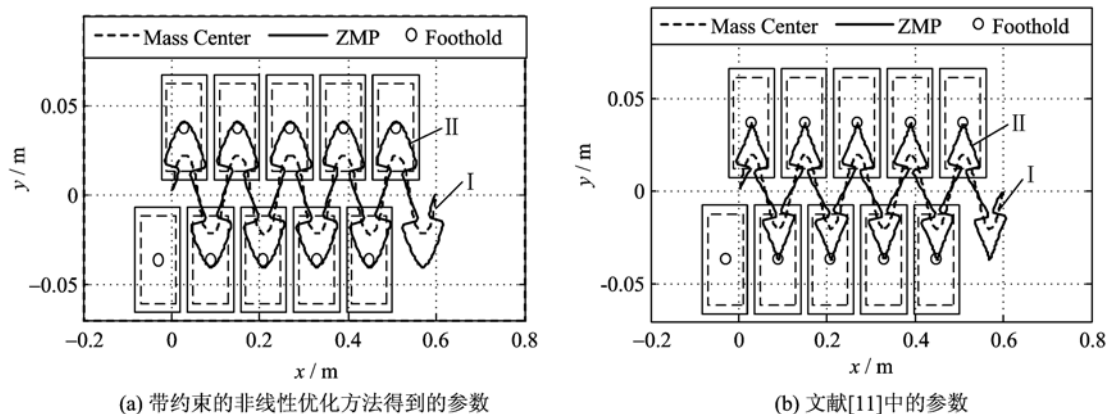


图 3 6 s 内相同步行速度时两组不同参数下得到的 ZMP 轨迹与质心轨迹在地面上投影

Fig. 3 The ZMP trajectory and projection of Mass Center from two different groups of parameters in the same speed during 6 s

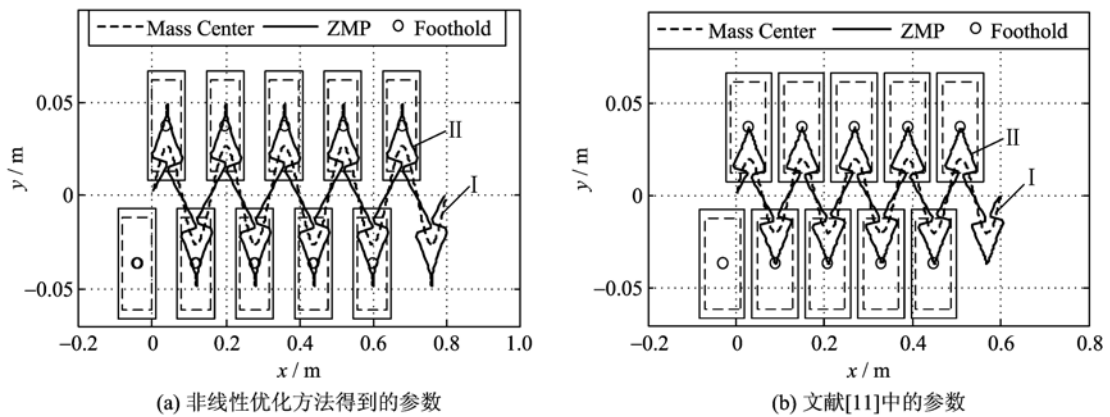


图 4 6 s 内相同稳定裕度下两组不同参数得到的 ZMP 轨迹与质心轨迹在地面上投影
 Fig. 4 The ZMP trajectory and projection of Mass Center from two different groups of parameters in the same stability during 6 s

三个角度验证本文所述方法的有效性. 在不限速度不限稳定性时, 本文方法求解出的参数得到的步行速度和稳定裕度都要比文献[11]更优; 相同步行速度时, 所述方法比文献[11]中的稳定裕度高; 相同稳定裕度时, 所述方法比文献[11]步行速度快. 以上只是仿真结果, 下面将给出 DARwIn-OP 实验平台实测数据.

3 实验研究

实验研究采用的实验平台是 DARwIn-OP 仿人机器人. DARwIn-OP 是一款开源智能仿人形机器人, 包含三轴加速度计、陀螺仪、麦克风等传感器, 支持 C++ 语言编程, 整机 20 个自由度; 机器人两手臂平直伸展开总长度为 542 mm, 机器人站直总高度为 454.5 mm, 其中机器人腿长 219.5 mm, 头部到肩部的高度为 113.0 mm. 机器人本体总重量为 2.9 kg. 实验平台 DARwIn-OP 机器人如图 5 所示.

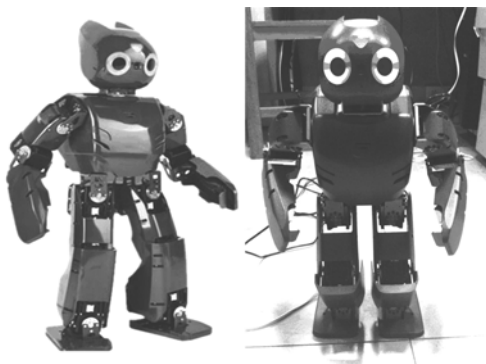


图 5 DARwIn-OP 仿人机器人实验平台
 Fig. 5 The open humanoid platform DARwIn-OP

为了验证本文所述参数优化选择方法的有效性, 设计 DARwIn-OP 上的行走实验. 在相同的地面环境下, 依次调整 DARwIn-OP 机器人的步行参数 $\rho_m^1, \rho_b^1 / \rho_m^1, \rho_b^2$ 为上述仿真实验中的四组参数. 在机器人行走的过程中采样机器人全身的 20 个关节转角, 总采样时间为 6 s, 通过正运动学求解计算机器人的质心运动过的实际距离. 对应仿真实验中的三组对比实验, 下面给出实际机器人在不同参数下运动的质心和脚步轨迹对比如图 6~8 所示, 图中上虚线为左脚轨迹, 下虚线为右脚轨迹, 实线为质心轨迹. 由图 6~8 可见, 质心和脚步的轨迹均具有周期性, 所测试的三组参数下机器人均能稳定行走.

第一组参数下质心和脚步轨迹如图 6 所示. 在 6 s 时间行走实验时间内, 带约束的非线性优化方法求出的参数下机器人走了 1.164 m, 文献[11]中参数下机器人行走了为 0.674 4 m, 前两者的速度和稳定性与后者相比均有明显提高, 验证了本论文提出算法的有效性.

第二组参数下质心和脚步轨迹如图 7 所示. 在 6 s 内, 带约束的非线性优化方法求出的参数下机器人走了 0.678 3 m, 文献[11]中参数下机器人行走距离为 0.674 4 m. 实际实验观察, 前者行走中更稳定.

第三组参数下质心和脚步轨迹如图 8 所示. 在 6 s 内, 带约束的非线性优化方法求出的参数下机器人走了 0.870 9 m, 文献[11]中参数下机器人行走距离为 0.674 4 m, 在稳定性相同的情况下, 所述方法能得到更快的速度.

由图 6~8 可见, 按照本文方法求解所得的参数能在保证步行稳定性的情况下, 有效地提高原有步

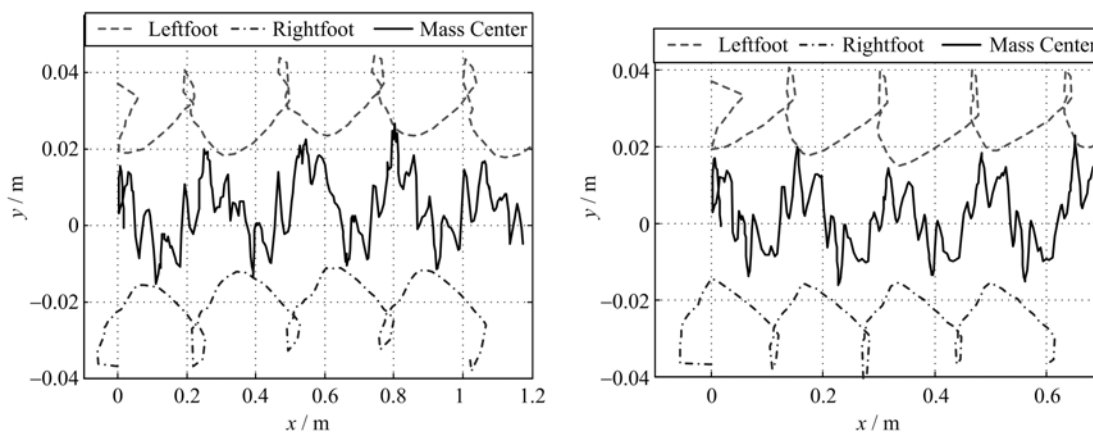


图 6 6 s 时间内两组不同参数下的脚步和质心运动轨迹在水平面上的投影

Fig. 6 The projection of foot and Mass Center trajectory from two different groups of parameters during 6 s

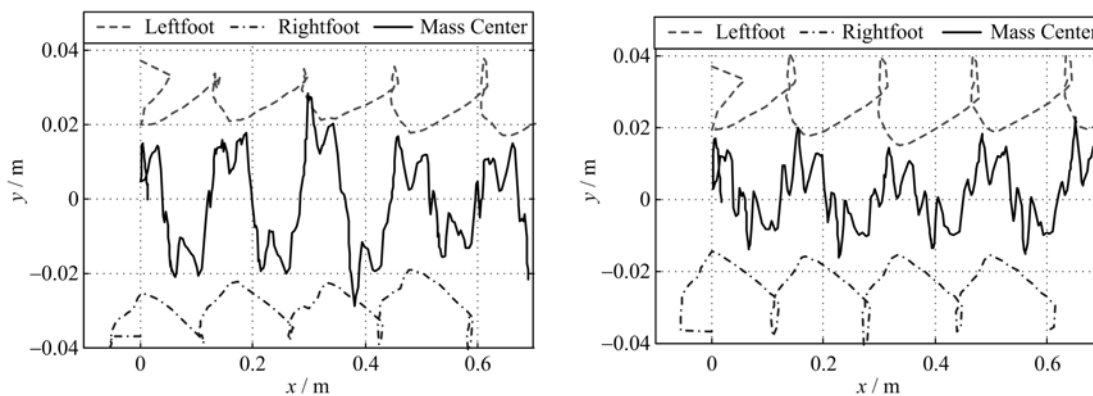


图 7 6 s 时间内相同速度时脚步和质心运动轨迹在水平面上的投影

Fig. 7 The projection of foot and Mass Center trajectory with the same walking speed during 6 s

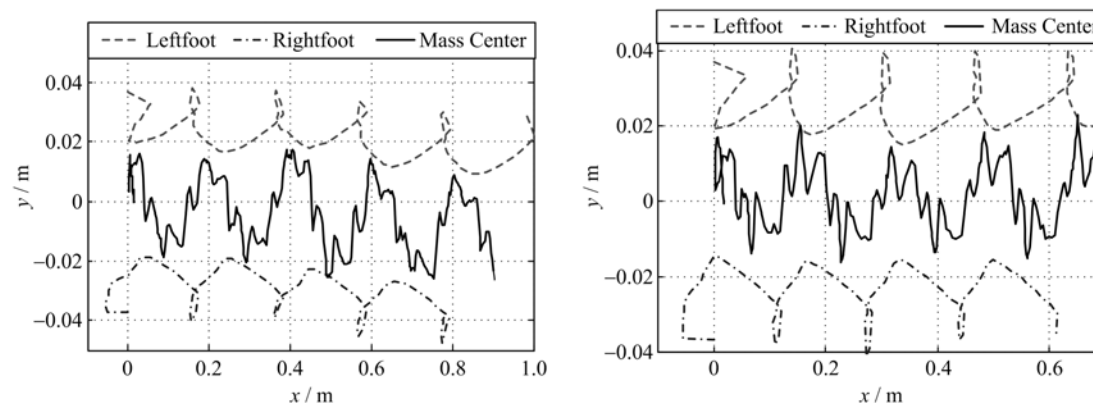


图 8 6 s 时间内相同稳定裕度时脚步和质心运动轨迹在水平面上的投影

Fig. 8 The projection of foot and Mass Center trajectory with the same stability during 6 s

行速度. 相应地, 如果在合理的范围内改变步行周期等固有参数, 同样也可以用上面的优化方法, 求出能保证步行稳定性的步行幅值参数. 以上四组参数均能保证稳定行走.

4 结论

在理论方面, 本文先分析了基于振荡器模型的步态规划方法原理, 给出了基于振荡器模型步态规

划算法.在此基础上,提出了离线振荡器模型参数优化选择方法,经过理论分析、仿真验证,说明了优化方法所得参数的合理性.在实验研究方面,利用上述方法在实际的 DARwIn-OP 仿人机器人平台上进行机器人步行实验,验证了上述步态规划方法和参数优化的有效性.在此项研究工作的基础上,还需要进一步研究在线参数调整方法以及步行平衡控制策略,以期提高机器人在不平坦地面上行走的能力.

参考文献(References)

- [1] 梶田秀司. 仿人机器人[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [2] 陈恳, 付成龙. 仿人机器人[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [3] Vukobratovic M, Borvac B. Zero-moment point-thirty five years of its life [J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2004, 1(1): 157-173.
- [4] Kajita S, Matsumoto O, Saigo M. Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs [C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea; IEEE Press, 2001, 3: 2 299-2 306.
- [5] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation[C]// *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Maui, USA; IEEE Press, 2001, 1: 239-246.
- [6] Takenaka T, Matsumoto T, Yoshiike T. Real time motion generation and control for biped robot-1st report: Walking gait pattern generation [C]// *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, USA; IEEE Press, 2009; 1 084-1 091.
- [7] Sugihara T, Nakamura Y. A fast online gait planning with boundary condition relaxation for humanoid robots [C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain; IEEE Press, 2005: 305-310.
- [8] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Taipei, China; IEEE, 2003, 2: 1 620-1 626.
- [9] Morimoto J, Endo G, Nakanishi J, et al. A biologically inspired biped locomotion strategy for humanoid robots: Modulation of sinusoidal patterns by a coupled oscillator model[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(1): 185-191.
- [10] Endo G, Nakanishi J, Morimoto J, et al. Experimental studies of a neural oscillator for biped locomotion with QRIO[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain; IEEE Press, 2005: 596-602.
- [11] Ha I, Tamura Y, Asama H. Gait pattern generation and stabilization for humanoid robot based on coupled oscillators [C]// *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, USA; IEEE Press, 2011: 3 207-3 212.
- [12] 夏泽洋, 陈恳, 刘莉, 等. 面向仿人机器人自然步态规划的人体步行实验分析[J]. *机器人*, 2008, 30(1): 41-46.