

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.024

基于重心稳定约束的下肢外骨骼助行机器人 静稳定步态规划方法^{*}

李 娟, 蔡校蔚, 李伟达, 张 宵, 朱其欢
(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

摘要:针对步态规划中仅用几个参数确定机器人关键位置、再对关键位置进行插值或多阶曲线拟合而导致的实际重心轨迹与目标轨迹相差较大的问题,对下肢外骨骼机器人步态规划方法进行了研究,提出了一种逆向的利用遗传算法直接根据重心求解关节位置的方法。采用D-H法对下肢外骨骼机器人进行了运动学建模,得到了重心与机器人关节位置之间的关系。基于稳定裕度最大规划了机器人的重心轨迹。在几何关系约束下采用遗传算法求解了各关节位置,并根据逆运动学模型得到各关节转角值,使实际重心轨迹与目标轨迹高度吻合。最后,进行了机器人带动穿戴者行走实验。实验结果证明:该规划方法具有可行性和有效性。

关键词:下肢外骨骼;步态规划;重心;遗传算法

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-1075-06

Static stable gait planning based on center of gravity stability constraint for lower limb exoskeleton walking aid robot

LI Juan, CAI Xiao-wei, LI Wei-da, ZHANG Xiao, ZHU Qi-huan
(School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: In order to solve the problem of large error between the actual and objective COG (center of gravity) trajectory, which caused by using only a few parameters to determine the key positions of the robot and then interpolating the key positions, a gait planning method of the lower limb exoskeleton robot was investigated. The genetic algorithm was used to solve the joints position directly based on the COG in this method. The kinematics model of the robot using D-H method was established, and the relationship between the COG and the joints position was obtained. The COG trajectory of the robot was planned based on the maximum stability margin. Under geometric constraint, joints position was obtained using the genetic algorithm and each joint angle was calculated according to the inverse kinematics model. The method made the actual and objective COG trajectories be highly consistent. Finally, the robot walking experiment was carried out to verify the reasonableness of the method. The experimental result shows the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: lower limb exoskeleton; gait planning; center of gravity; genetic algorithm

0 引 言

针对不同的机器人步态规划方法,许多学者进行了研究。为了能够实现行走,一般采取动态稳定的规划方法,以ZMP(零力矩点)为稳定性判据。文献[1-6]是基于动力学模型的步态规划方法,该方法建模

相对简洁容易,但忽视较多细节,对于腿部质量较大的下肢外骨骼助行机器人不太适用;文献[7-9]是基于连杆模型优化的步态规划方法,该方法是将机器人建模成为复杂的连杆模型,设定最优目标函数,通过优化参数得到期望的最优步态,其物理含义明确直观、可靠性高,但运算较复杂;文献[10-13]以稳定裕度最大为优

收稿日期:2017-01-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2015AA042301)

作者简介:李娟(1978-),女,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事医疗康复训练机器人方面的研究。E-mail:lijuan@suda.edu.cn

化目标进行优化求解。付根平博士对该方法进行了详细研究,其首先规划机器人的关键位置点的姿态,以两髋中心到支撑腿踝关节 x 和 y 方向的距离参数表示,之后通过三次样条插值得到一个周期的光滑姿态轨迹,再以各时刻 ZMP 到稳定区域中心的距离为参数构建评估步态稳定性的目标函数,采用粒子群优化算法对三次样条插值规划步态中的两髋中心距离参数进行优化,以期得到稳定裕度大的步态。但该方法存在两个明显的不足,一是计算量大、编程繁琐,当插值点较多时,整个目标函数的表达式变得异常复杂;二是由于插值点少和三次样条函数固有的形态,待求 ZMP 轨迹曲线只能接近目标 ZMP 轨迹曲线,不能完全重合。且当含参变量、插值点少时,待求轨迹和目标轨迹会有较大差距。

对于注重稳定性且慢速行走的下肢外骨骼助行机器人,本研究将采用更严格的静态稳定的规划方法。

1 运动学建模

为了得到机器人在矢状面(前进方向, x 方向)和额状面(左右方向, y 方向)的运动状态,本研究对机器人采用 D-H 法建模。考虑到左右对称性,本研究以双足额状面中线为 x 轴、右足脚后跟为 y 轴建立全局坐标系。机器人共有 8 个自由度,在一条腿中的矢状面方向,髋、膝、踝各一个自由度,额状面方向,踝关节一个自由度。定义一只脚从第一次触地到第二次触地跨过的距离为步长 D_{step} ,两足中点 y 方向距离为步宽 W_{hip} ,周期步行两足触地时错开半步长。

全局坐标系如图 1 所示。

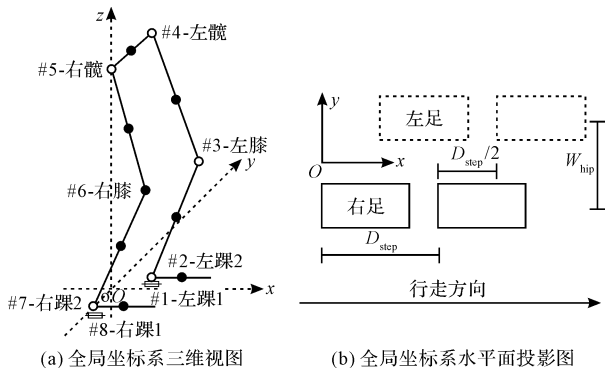


图 1 全局坐标系

本研究以双腿支撑相作为一个步态周期的起始点,以左踝 1(额状面的自由度)关节为第一个关节。用 D-H 矩阵表达各相邻关节坐标系的变换关系和各关节局部坐标系与全局坐标系的变换关系。相邻关节坐标系变换矩阵如下式所示:

$${}^nT_{n+1} = \begin{bmatrix} C\theta_{n+1} & -S\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & S\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & \alpha_{n+1}C\theta_{n+1} \\ S\theta_{n+1} & C\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & -C\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & \alpha_{n+1}S\theta_{n+1} \\ 0 & S\alpha_{n+1} & C\alpha_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n —坐标系序号; C — $\cos$ 运算; S — $\sin$ 运算。

D-H 参数表如表 1 所示^[14-15]。

表 1 下肢外骨骼助行机器人 D-H 参数表

坐标系序号	θ	d	a	α
0 → 1	$\pi/2$	$D_{step}/2$	$W_{hip}/2$	$\pi/2$
1 → 2	$\pi/2 + \theta_1$	0	0	$\pi/2$
2 → 3	θ_2	0	l_{shank}	0
3 → 4	θ_3	0	l_{thigh}	0
4 → 5	$\pi + \theta_4$	$-W_{hip}$	0	0
5 → 6	θ_5	0	l_{thigh}	0
6 → 7	θ_6	0	l_{shank}	0
7 → 8	θ_7	0	l_{foot}	0

注: θ —绕 z 轴旋转角度, rad; d —延 z 轴平移的距离, m; a —沿已经旋转过的 x 轴平移的距离, m; α — z 轴绕 x 轴旋转的角度, rad; l_{thigh} —大腿长; l_{shank} —小腿长

第 n 个关节在全局坐标系中的位置通过下式求出:

$${}^R T_n = {}^R T_1 T_2 T_3 \dots T_n \quad (2)$$

本研究使用重心投影法稳定性判据,因此在整个步态规划的时候需要计算重心位置。重心在水平面内的计算公式如下式所示:

$$\begin{cases} X_c = \sum_{i=1}^n m_i x_i / \sum_{i=1}^n m_i \\ Y_c = \sum_{i=1}^n m_i y_i / \sum_{i=1}^n m_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: m_i —各连杆的质量; x_i —各连杆重心在水平面内 x 方向的坐标值; y_i —水平面内 y 方向的坐标值。

假设各杆件的质量均匀分布的,重心在其几何中心,如图 1(a) 中黑色实心点所示。通过运动学模型和下式即可算出机器人重心坐标在全局坐标系水平面的值:

$$\begin{cases} X_c = \frac{1}{M} (x_{lth} m_{th} + x_{lsh} m_{sh} + x_{lf} m_f + x_{rth} m_{th} + x_{rsh} m_{sh} + x_{rf} m_f + x_{hip} m_{up}) \\ Y_c = \frac{1}{M} (y_{lth} m_{th} + y_{lsh} m_{sh} + y_{lf} m_f + y_{rth} m_{th} + y_{rsh} m_{sh} + y_{rf} m_f + y_{hip} m_{up}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_c, Y_c —机器人在水平面内的重心坐标; M —机器人整体质量; m_{up} —上身质量; x_{lth}, x_{lsh}, x_{lf} —左大腿、左小腿、左足几何中心 x 坐标值, $x_{lth} = (x_{hip} + x_{lknee})/2$, $x_{lsh} = (x_{lknee} + x_{lankle})/2$, $x_{lf} = x_{lankle} + l_{foot}/2$;

l_{foot} —足部长度; $x_{\text{hip}}, x_{\text{knee}}, x_{\text{ankle}}$ —左髋、膝、踝关节在全局坐标系中 x 方向的坐标值,右肢参数同理; y_{mhip} —两髋中心 y 坐标值; $y_{\text{lh}}, y_{\text{ls}}, y_{\text{lf}}$ —左大腿、左小腿、左足几何中心 y 坐标值, $y_{\text{lh}} = (y_{\text{hip}} + y_{\text{knee}})/2$, $y_{\text{ls}} = (y_{\text{knee}} + y_{\text{ankle}})/2$, $y_{\text{lf}} = y_{\text{ankle}}$; $y_{\text{hip}}, y_{\text{knee}}, y_{\text{ankle}}$ —左髋、膝、踝关节在全局坐标系中 y 方向的坐标值,右肢参数同理。

2 步态轨迹生成

本研究首先建立运动学模型,再给定一条稳定裕度大且光滑的重心轨迹,之后将该重心轨迹离散成 N 个点,根据每个点的重心值计算相应点的各关节的位置,最后通过逆运动学模型解出各关节的转角值。步态规划分为两个时间段, $0 \sim T$ 时为双腿支撑相期, $T \sim 2T$ 时为左腿单腿支撑相、右腿摆动相期。

2.1 髋关节轨迹规划

由于机器人髋关节距离地面最远,其位置的改变对重心的影响最大,髋关节的轨迹规划非常关键。为减少计算量,在步态规划中保持髋关节高度不变。但由于本实验平台的机器人在侧倾时左右两髋的高度不一致,规划中,记两髋中心为点 P_{ref} ,使其高度保持为定值 H_p 。 H_p 是一个较为关键的参数,若较小,则关节弯曲角度大,承受力矩大;若较大,则在双腿支撑相时可能满足不了几何关系,极限条件为后腿髋、膝、踝关节共线。在满足几何关系的情况下, H_p 越大越好。本研究中机器人样机两髋中心到地面为890 mm,在侧倾角度为0.3 rad、 P_{ref} 在 x 方向距后脚后跟300 mm(步长200 mm + 错开的半步长100 mm)的极限条件下,计算出 P_{ref} 距地面高度为800 mm。为留有余量,该设计的

H_p 定为780 mm。记 P_{ref} 的坐标为 $(x_{\text{pref}}, y_{\text{pref}}, z_{\text{pref}})$, $x_{\text{pref}}, y_{\text{pref}}$ 和 z_{pref} 为 P_{ref} 坐标随时间变化的函数。步态规划中 z_{pref} 为定值 H_p , $x_{\text{pref}}, y_{\text{pref}}$ 并不事先规划,而是通过规划的重心和几何约束求解出的参量。在确定了中心点 P_{ref} 坐标后,左右髋关节坐标可通过几何关系求得。

2.2 踝关节轨迹规划

除了规划 P_{ref} 轨迹,在左腿单腿支撑相(即右腿摆动相)期间,还需规划摆动腿的踝关节轨迹。该期间踝关节的轨迹至关重要,不仅决定了步长的大小,还影响了抬腿、落地的效果。为了得到光滑的轨迹形态,需保证在抬腿和落地时 x 方向和 z 方向的速度都为0,即约束条件 $\dot{x}(t)|_{t=T} = \dot{x}(t)|_{t=2T} = 0$, $\dot{z}(t)|_{t=T} = \dot{z}(t)|_{t=2T} = 0$ 。 $t = T$ 时刻为摆动腿抬腿起始点, $t = 2T$ 为落地点。为达到该要求,可以用高次多项式进行规划。由于 x 方向为简单单调增函数,用3次多项式即可达到满意效果; z 方向类似于抛物线形态,使用4次多项式可达到满意效果。最终确定摆动腿踝关节的关节轨迹如下式所示:

$$\begin{cases} x(t) = D_{\text{step}} \cdot \left(-2 \left(\frac{(t-T)}{T} \right)^3 + 3 \left(\frac{(t-T)}{T} \right)^2 \right) & t \in [T, 2T) \\ z(t) = H_{\text{ankle}} \cdot \left(16 \left(\frac{(t-T)}{T} \right)^4 - 32 \left(\frac{(t-T)}{T} \right)^3 + 16 \left(\frac{(t-T)}{T} \right)^2 \right) & t \in [T, 2T) \end{cases} \quad (5)$$

根据步态参数摆动相时间 $T = 10$ s, 迈步距离200 mm, 抬腿高度40 mm, 踝关节摆动相时的轨迹曲线如图2所示。

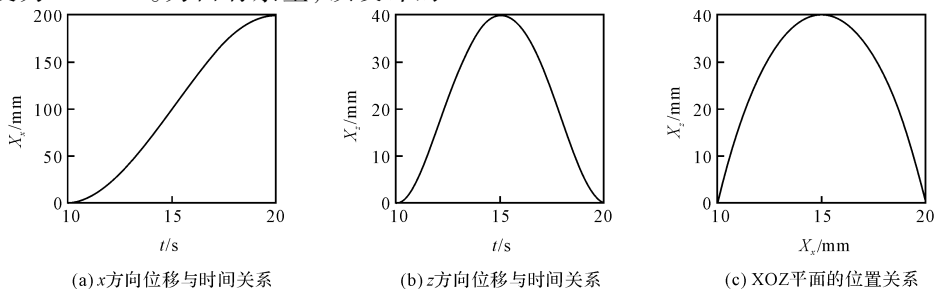


图2 摆动腿踝关节轨迹

在周期步态的前半个周期内,左足一直触地,其踝关节坐标方程如下式所示:

$$\begin{cases} x_{\text{ankle}}(t) = \frac{D_{\text{step}}}{2} \\ y_{\text{ankle}}(t) = \frac{W_{\text{hip}}}{2} \\ z_{\text{ankle}}(t) = 0 \end{cases} \quad t \in [0, 2T) \quad (6)$$

在双支撑相期($0 \sim T$ 时刻),右足一直触地,右踝关节坐标如下式所示:

$$\begin{cases} x_{\text{ankle}}(t) = 0 \\ y_{\text{ankle}}(t) = -\frac{W_{\text{hip}}}{2} \\ z_{\text{ankle}}(t) = 0 \end{cases} \quad t \in [0, T) \quad (7)$$

2.3 膝关节轨迹规划

单腿下肢位置关系如图 3 所示。

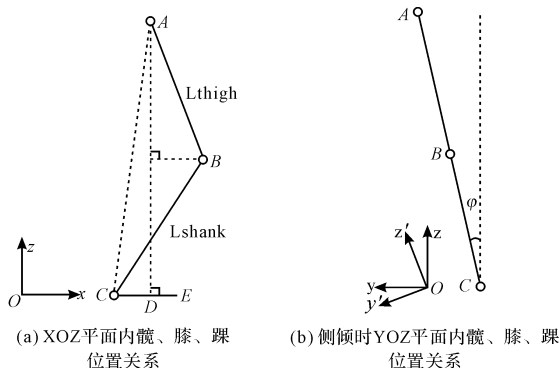


图 3 髋、膝、踝位置关系

膝关节位置可由髋、踝关节的坐标唯一确定,如下式所表示:

$$\begin{cases} x_b = x_a + |AB| \sin(\angle DAB) \\ y_b = y_a \\ z_b = z_a - |AB| \cos(\angle DAB) \end{cases} \quad (8)$$

式中:A—髋关节,B—膝关节,C—踝关节,D—髋关节投影。

$$\angle DAB = \angle CAB - \angle CAD;$$

$$\angle CAB = \arccos(|AC|^2 + |AB|^2 - |BC|^2 / 2|AC||AB|);$$

$$\angle CAD = \arctan |CD| / |AD|。$$

考虑到当机器人在额状面有运动时,膝关节的坐标需通过坐标变换做一定的修正,如下式:

$$\begin{cases} x_b' = x_b \\ y_b' = 0 \\ z_b' = \frac{z_b}{\cos\varphi} \end{cases} \quad (9)$$

式中: φ —机器人在额状面转过的角度。

3 步态优化

步态优化的过程即为根据重心求解各关节坐标的过程,重心轨迹的好坏直接影响到整个步态的优劣。重心轨迹如图 4 所示。

重心轨迹的确定原则为稳定裕度大和光滑连续。稳定裕度越大,即轨迹曲线越靠近支撑多边形中心,机器人越稳定。在单相支撑期,最大稳定裕度点在支撑足中心;在双相支撑期,最大稳定裕度点在双足中心,如图 4 中圆点所示。当把这些圆点用直线连接起来即为理论上稳定裕度最大轨迹曲线(图中点划线),但该轨迹存在尖角会导致步态的不自然和过大的加速度。图中矩形

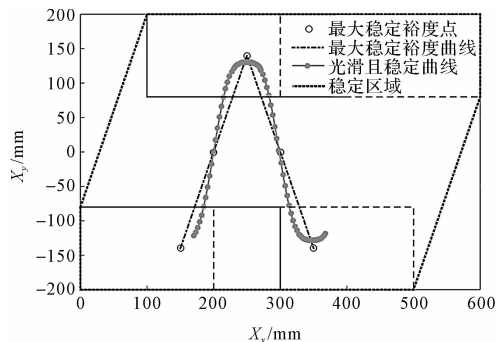


图 4 重心轨迹

为足底边界,虚线为行走过程中的稳定区域边界。

为了得到光滑的重心轨迹,避免重心轨迹变化较大引起失稳,同时避免过大的计算量,本研究选用三角函数多项式逼近最大稳定裕度直线。根据步态参数,通过使用 Matlab 拟合工具箱,最终得到目标重心轨迹在水平面的位置关系(轨迹曲线如图 4 中带圆点绿实线所示):

$$Y_c = 144.7 \sin(0.03142X_c) + 14.24 \sin(0.09425X_c) \quad (10)$$

步态优化的目标是为了尽量使规划的重心轨迹与目标轨迹接近,需对未知参数 x_{pref} 和 y_{pref} 进行优化求解。由于重心方程复杂,不能得到 x_{pref} 和 y_{pref} 的解析解。遗传算法(GA)能够最大程度地实现全局最优,对问题本身的依赖也较少,这些特征使得 GA 很适合求解多变量单目标的约束优化问题。本研究采用 GA 进行参数优化求解。为使步态规划的重心轨迹与目标轨迹尽量接近,构造的目标函数如下式所示:

$$J = (Act(X_i(x_{pref}, y_{pref})) - Targ(X_i))^2 + (Act(Y_i(x_{pref}, y_{pref})) - Targ(Y_i))^2 \quad (11)$$

式中: $Act(X_i), Act(Y_i)$ —第 i 个时间点待规划的重心轨迹的 X, Y 坐标值,是关于 x_{pref} 和 y_{pref} 的函数; $Targ(X_i), Targ(Y_i)$ —第 i 个时间点目标重心轨迹的 X, Y 坐标值; J —优化的目标,越小越好; x_{pref}, y_{pref} —待优化的参数。

根据一个周期内重心的移动范围,确定 x_{pref} 和 y_{pref} 的约束条件为下式:

$$\begin{cases} 100 < x_{pref} < 350 \\ -255 < y_{pref} < 255 \end{cases} \quad (12)$$

遗传算法的优化过程为:(1) 随机生成范围内的 x_{pref} 和 y_{pref} ;(2) 计算适应度;(3) 判断是否满足终止条件,若满足则退出,不满足则进行下一步;(4) 选择复制操作;(5) 交叉操作;(6) 变异操作;(7) 接下来回到步骤(2)进行新一轮的优化。

本研究设定求解的精度为 1 mm,采用常用的二进制编码。 x_{pref} 的可能解个数大于 128 个,小于 256 个,因此

用8位二进制数表示, y_{pref} 的可能解个数大于256个,小于512个,因此用9位二进制数表示,确定染色体长度为17位。由于优化目标是最小值,且非负,适应度取 $fitness_value = 1/J$ 。使用Matlab编程,主函数为GeneticAlgorithmForGait(PopSize,ChromoSize,GenerationSize,CrossRate,MutationRate,Elitism)。各参数取值及含义为:PopSize = 20,种群大小;ChromoSize = 17,染色体长度;GenerationSize = 40,进化代数;CrossRate = 0.5,交叉概率;MutateRate = 0.05,变异概率;Elitism = 1,精英选择。

目标重心轨迹与规划重心轨迹如图5所示。

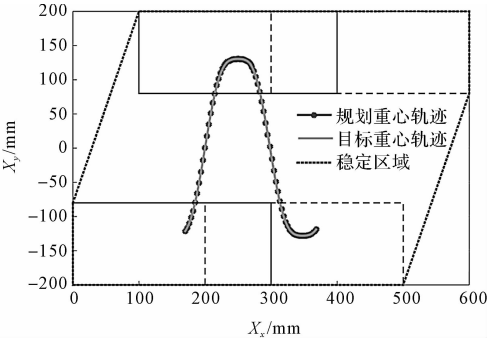


图5 目标重心轨迹与规划重心轨迹

笔者按照上述优化流程,通过遗传算法得到各时间点的 x_{pref} 和 y_{pref} ,后计算出所有关节坐标,最终算出规划的重心轨迹,如图5中带圆点实线所示。目标重心轨迹为图5中的实线。从图5中可以看出,两条轨迹几乎重合,说明本方法的可行性和遗传算法的有效性。

依据上述计算结果,可得一个完整周期中髋、膝、踝的 x 、 y 、 z 坐标。当得到所有关节的坐标值后,通过表1的机器人D-H参数表和逆运动学,可计算出一个完整周期的各关节的转角。各关节转角值曲线如图6所示。

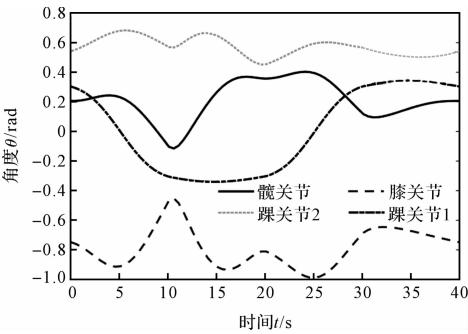


图6 一个周期中各关节角度曲线

各关节的角速度曲线如图7所示。其中,踝关节1为额状面自由度关节,踝关节2为矢状面自由度关节。

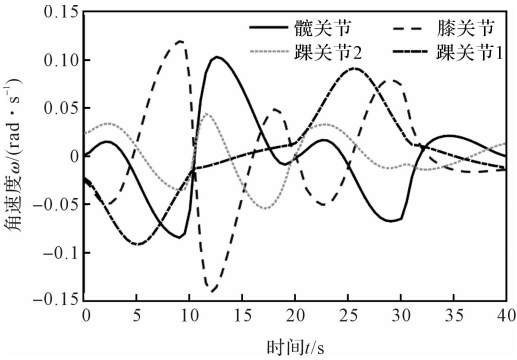


图7 一个周期中各关节角速度曲线

4 实验

为验证本研究所规划的轨迹是否合理,笔者进行了实验验证。该设计的控制系统采用PMAC运动控制卡加上位机的方式。本研究把角度轨迹输入到控制器中,下机器人可以带动穿戴者按预期的轨迹运动。

运动姿态如图8所示。

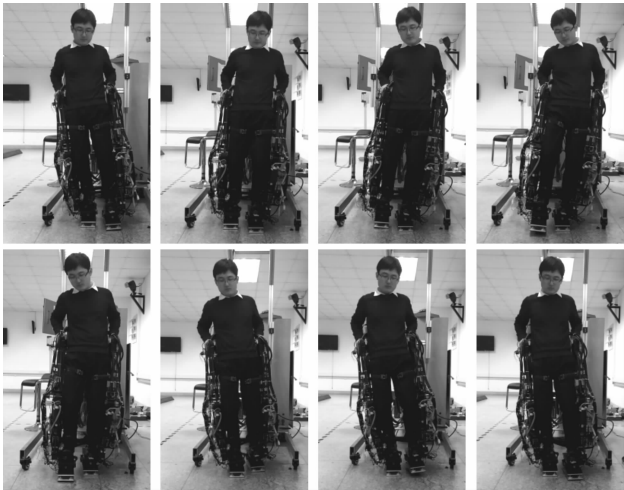


图8 人机步行姿态图

机器人行走过程中,各关节转动平滑,步态连续性好,能够稳定行走。

机器人双足底部安装了自行设计重心测量系统,可以获取人机系统的实际重心轨迹,如图9中的实线所示。图9中虚线为规划重心轨迹。其中,机器人空载行走时规划重心轨迹和实测重心轨迹对比图如图9(a~b)所示。可以发现,实测重心轨迹基本符合规划重心轨迹,两者误差较小,误差可能来自数学建模的不精确、机械的传动和实际环境的干扰等。机器人带动穿戴者运动时的规划重心轨迹和实测重心轨迹对比图如图9(c~d)所示。带人运动时,实测重心轨迹与规划重心轨迹的误差明显增大,这是由于人是一个较大的干扰因素,会对规划重心

轨迹造成影响。在运动过程中,人会不自觉地微调姿态,但实测重心轨迹总体形态依旧符合规划轨迹,且都在稳定范围内。

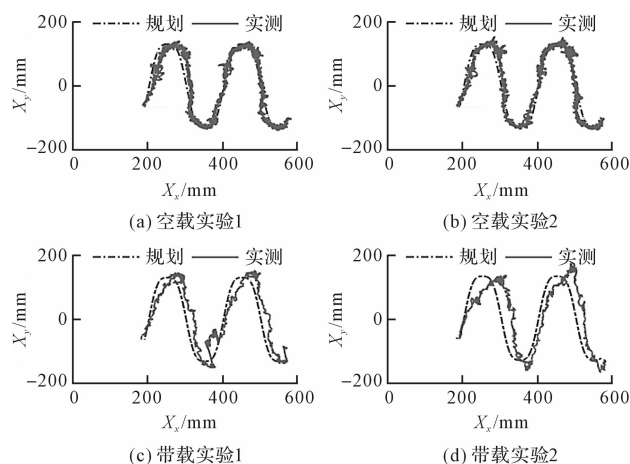


图9 规划重心轨迹与实测重心轨迹图

5 结束语

本研究采用基于优化的步态规划方法规划了下肢外骨骼助行机器人的运动步态。具体使用了重心约束加几何约束方法,通过遗传算法求解出各重心位置点对应的各关节变量值,最终得到了一个周期完整的各关节的角度轨迹。

本研究提出的方法简洁、方便和准确,整个步态规划的代码量较少;直接通过重心位置计算出每个采样点的各关节坐标,保证了所求重心轨迹和目标重心轨迹基本重合,可以得到稳定裕度最大的步态轨迹,更接近目标重心轨迹。且各关节轨迹平滑,步态连续性好。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO J, ZHANG X, TANG C. Gait planning of biped robot based on feed-forward compensation of gravity moment [C]. International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing: IEEE, 2015.
- [2] KAJITA S, MORISAWA M, MIURA K, et al. Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei: IEEE, 2010.
- [3] KAJITA S, KANEHIRO F, KANEKO K, et al. Biped walking pattern generation by a simple three-dimensional inverted pendulum model [J]. **Advanced Robotics**, 2003, 17 (2): 131-147.
- [4] HARADA K, MORISAWA M, MIURA K, et al. Kinodynamic gait planning for full-body humanoid robots [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice: IEEE, 2008.
- [5] KIM J H. Walking pattern generation of a biped walking robot using convolution sum [C]. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Pittsburgh: IEEE, 2009.
- [6] KAJITA S, NAGASAKI T, KANEKO K, et al. ZMP-based biped running control [J]. **Robotics & Automation Magazine**, 2007, 14 (2): 63-72.
- [7] 宫赤坤, 张智斌. 仿人双足机器人步行轨迹规划及实现 [J]. **机械传动**, 2012, 36 (8): 27-30.
- [8] SILVA P, SANTOS C P, MATOS V, et al. Automatic generation of biped locomotion controllers using genetic programming [J]. **Robotics & Autonomous Systems**, 2014, 62 (10): 1531-1548.
- [9] BRANDAO M, HASHIMOTO K, SANTOS V J, et al. Gait planning for biped locomotion on slippery terrain [C]. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Madrid: IEEE, 2015.
- [10] KHERICI N, ALI Y M B. Using PSO for a walk of a biped robot [J]. **Journal of Computational Science**, 2014, 5 (5): 743-749.
- [11] MOUSAVI P N, NATARAJ C, Bagheri A, et al. Mathematical simulation of combined trajectory paths of a seven link biped robot [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2008, 32 (7): 1445-1462.
- [12] 付根平. 仿人机器人的步态规划和步行控制研究 [D]. 广州: 广东工业大学自动化学院, 2013.
- [13] 吴泽琦, 吴根忠. 基于遗传算法优化的仿人足球机器人步态规划研究 [J]. **机电工程**, 2012, 29 (11): 1340-1344.
- [14] 郭小宝, 赵振, 陈落根. 基于能量法的重载码垛机器人重力平衡分析与设计 [J]. **包装与食品机械**, 2015 (6): 43-46.
- [15] SAEED B N, 孙富春, 朱纪洪, 等. 机器人学导论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

李娟, 蔡校蔚, 李伟达, 等. 基于重心稳定约束的下肢外骨骼助行机器人静稳定步态规划方法 [J]. **机电工程**, 2017, 34 (9): 1075 - 1080.

LI Juan, CAI Xiao-wei, LI Wei-da, et al. Static stable gait planning based on center of gravity stability constraint for lower limb exoskeleton walking aid robot [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34 (9): 1075 - 1080.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>