

基于动捕系统的机器人步态规划与实验研究

孙 军¹,吕连杰¹,孙诗华²,李东华¹

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国工业互联网研究院辽宁分院,辽宁 沈阳 110020)

摘 要 目的 针对机器人行走时髋关节高度与人体髋关节变化规律不相符的现象,提出一种模仿人类步行的步态规划方法,以增强机器人运动的拟人性,减少能耗损失,增强行走稳定性。**方法** 将动捕系统采集的人体步行数据进行递推平均滤波和 savgol_filter 函数预处理后得到人体步行样本;对人体步行样本进行几何缩放后生成机器人步行样本,从中提取机器人运动学参数;采用五次样条插值算法,依据人体步行样本运动规律,规划机器人下肢关节参数化运动轨迹;利用多目标粒子群优化算法得到一组满足三个设定目标的机器人运动学参数;将该组运动学参数代入机器人下肢关节参数化轨迹方程,建立机器人前向和侧向运动学模型,利用逆运动学求解下肢关节角度;使用 NAO 机器人验证步态规划的可行性。**结果** 预处理能消除噪声点;几何缩放解决了机器人与人在肢体长度等方面存在的差异;五次样条插值规划的关节运动轨迹的平均相似度为 95% 以上;多目标粒子群算法优化结果显示:若机器人具有较高的步行稳定性,则会以降低步行速度为代价;机器人下肢髋、踝关节翻滚角度存在大小相等、方向相反的变化规律;机器人物理样机的 ZMP 轨迹位于支撑多边形内部;机器人行走步态与人体步行样本具有相似性。**结论** 模仿人类步行的步态规划方法使机器人行走步态具有高稳态、低能耗、拟人化的行走特性。

关键词 人形机器人;动作捕捉;步态规划;逆运动学

中图分类号 TU689

文献标志码 A

Robot Gait Planning and Experimental Research Based on Motion Capture System

SUN Jun¹, Lü Lianjie¹, SUN Shihua², LI Donghua¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Branch of China Industrial Internet Research Institute, Shenyang, China, 110020)

Abstract: While the humanoid robot is walking, the varying pattern of the robot's hip joint height is different with human, in view of this phenomenon. This paper proposed a gait planning method to imitate human walking. The proposed method can make robot's walking more like human,

收稿日期:2021-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52075348)

作者简介:孙军(1963—),男,教授,博士,主要从事先进数控理论与应用、数字化应用技术等方面研究。

reduce the loss of energy consumption and enhance the walking stability. For achieving the human walking patterns, recursion average filtering and savgol_filter function are employed to process the human walking data collected by the motion capture system. And then geometric scaling is utilized to transfer the human walking patterns to robot walking patterns. The robot kinematic parameters can be extracted from robot walking patterns. Using the quintic spline interpolation algorithm, according to the motion law of human walking patterns, parametric motion trajectories of robot lower limb joints are planned. Multi-objective particle swarm optimization is used to obtain the robot kinematic parameters. The parameters must satisfy three set goals. The kinematic parameters are substituted into the parametric trajectory equations of the robot's lower limb joints, the forward and lateral kinematic models of the robot are established. Then inverse kinematics is used to obtain the joint angles of the lower limbs. Finally, the NAO robot can be utilized to verify the feasibility of gait planning. Pretreatment can eliminate noise points; Geometric scaling solves the differences between robot and human in terms of limb length; The average similarity of joint motion trajectories planned by quintic spline interpolation is more than 95%; The optimization result of the multi-objective particle swarm algorithm show that, If the robot has high walking stability, it will be at the cost of reducing walking speed; The roll angles of hip and ankle joints of robot lower limbs have the same size and opposite direction; The ZMP trajectory of the physical prototype of the robot is located inside the supporting polygon; Robot walking gait is similar to human walking patterns. The gait planning method that imitates human walking makes the walking gait of the robot have the characteristics of high steady state, low energy consumption and anthropomorphic walking.

Key words: humanoid robot; motion capture; gait planning; inverse kinematic

目前人形机器人的步态规划方法使机器人行走耗能较大而且行走表现僵硬。隋振等^[1]进行机器人步态规划时,假设质心距离地面始终保持相同高度,基于机器人三维线性倒立摆模型规划出质心参考轨迹。王亚波^[2]利用机器人质心高度不变的假设条件,依据离线规划的质心、踝关节位置轨迹,通过逆运动学求得机器人下肢各关节角度。张月^[3]采用线性倒立摆模型对机器人进行步态规划,其假设机器人行走过程中腰部总是保持水平状态,即假设倒立摆模型中质心运动约束平面的高度是固定的,因此髋关节高度也固定。E. Dong 等^[4]采用倒立摆模型进行机器人步态规划,假设机器人髋关节高度固定不变。但仿生生物力学研究表明,人类周期步行中髋关节相对地面的高度呈周期性变化,两髋关节的高度不是始终保持一致^[5]。上述研究虽然降低了自由度间的复杂协调关系及步态规划过程中的计算量,但

规划出的机器人行走步态与人类的步行方式不符。

鉴于上述分析,笔者使用 Perception Neuron PRO 动捕系统采集人体下肢关节运动数据,预处理后生成人体步行样本,利用几何缩放生成机器人步行样本,从中提取机器人运动学参数;采用五次样条插值规划下肢关节参数化运动轨迹;使用多目标粒子群优化算法得出最优运动学参数,从而得到机器人理想的关节位置轨迹;利用逆运动学求出下肢各关节角度,完成机器人的步态规划;研究表明:模仿人类步行的步态规划方法使机器人实现稳定行走,行走过程能量消耗较低,行走步态的拟人性效果好。

1 动捕系统

Perception Neuron PRO 由惯性传感器等硬件设备和配套软件组成,每一个惯性传感器都集成了 3 轴陀螺仪,3 轴加速度计和 3

轴电子罗盘^[6]。电子罗盘的动态范围:360°,陀螺仪范围:±2 000 rad/s,加速计范围:±16 m/s²。笔者利用该动捕系统进行人体运动数据采集实验。

2 人体步行样本获取及预处理

实验使用动捕系统采集人正常速度行走的运动数据,实验前在场地画线,让实验者练习多次直线行走后进行运动数据采集。由于实验设备会受磁场干扰,导致实验数据不光滑并出现噪声点^[7],采用递推平均滤波和savgol_filter函数进行平滑处理。

图1为髋关节预处理前后的运动数据。由图可知,平滑处理后得到了较为光滑的运动数据,并且人体髋关节竖直方向的运动轨迹存在周期性波动。

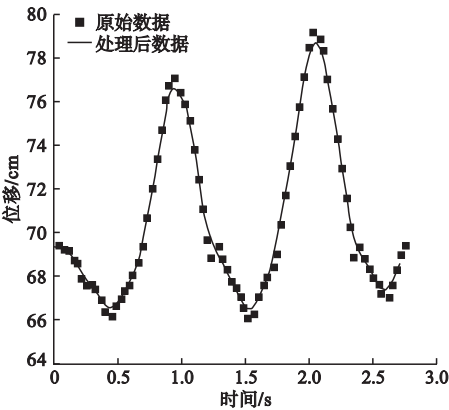


图1 左髋关节预处理前后的运动数据

Fig.1 Motion data of the left hip joint before and after preprocessing

3 人形机器人步行样本的生成

3.1 人形机器人—NAO

Softbank 有一款以 NAO 命名的人形机器人,全身共 13 个关节,每只足有 4 个压力传感器来确定每只脚压力中心位置,通过电阻值大小来反应承受压力值大小^[8]。

3.2 样本的几何缩放匹配

由于人与机器人在肢体长度等方面存在差异^[9],因此将预处理得到的人体髋、踝关

节的位置进行几何缩放。人体下肢骨骼与机器人下肢骨骼具有相同的结构,因此可以在两个骨骼之间加入一个中间骨骼实现样本的几何缩放^[10]。

在确定前进方向和竖直方向的缩放比例时,选择人体与机器人的下肢长度作为决定因素;在确定横向方向的缩放比例时,选择人体和机器人的两髋关节及两踝关节的距离作为决定因素。

三种骨骼的对应关系如图2所示, $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$ 代表人体骨骼肢体长度, $H1$ 、 $H2$ 、 $H3$ 代表中间骨骼肢体长度, $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ 代表机器人骨骼肢体长度。将三种类型骨骼的上身都简化成连杆,则有如下关系式:

$$\frac{L1}{H1} = \frac{L2}{H2} = \frac{L3}{H3} \tag{1}$$

$$H1 + H2 + H3 = D1 + D2 + D3. \tag{2}$$

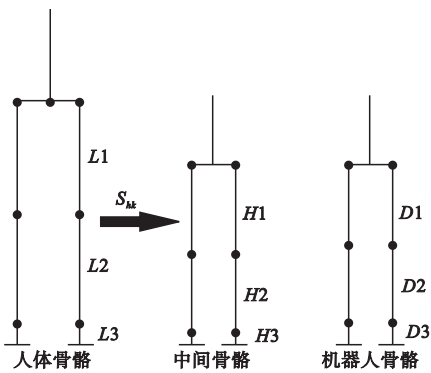


图2 三种骨骼的对应关系

Fig.2 Relationship of three bone linkages

3.2.1 缩放系数

通过上节的分析后计算从人体骨骼到中间骨骼的缩放比例。设 S_{hk} 为缩放比例, l_{rd} 为机器人步行参数, l_{md} 为人体步行参数,则有:

$$S_{hk} = \frac{l_{rd}}{l_{md}} \tag{3}$$

其中, h 取值为 1、2, 依次代表髋关节、踝关节; k 取值为 1、2、3, 依次代表横向方向、前进方向、竖直方向; d 取值为 1、2、3、4, 依次代表下肢总长度、两髋关节之间的距离、两踝关节之间的距离、大腿与小腿长度之和。

3.2.2 髌关节位置

将人体骨骼通过上一步的比例缩放后即可得到中间骨骼。由于两骨骼各关节长度都保持相同的比例,为得到中间骨骼髌关节的位置,仅需要将第2节预处理后的人体髌关节每一帧的动作数据进行缩放,缩放结果同样也是机器人髌关节的位置。方程为

$$\mathbf{H}_1^Z = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{12} & 0 \\ 0 & 0 & S_{13} \end{bmatrix} \times \mathbf{H}_1^P, i=1. \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_{1i} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{12} & 0 \\ 0 & 0 & S_{13} \end{bmatrix} \times (\mathbf{H}_i^P - \mathbf{H}_1^P). \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_i^Z = \mathbf{H}_1^Z + \mathbf{P}_{1i}, i=2, \dots, n. \quad (6)$$

其中, $\mathbf{H}_i^Z = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为第 i 帧的中间骨骼髌关节位置数据; $\mathbf{H}_i^P = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为人体髌关节预处理后的第 i 帧的位置数据。

3.2.3 踝关节位置

将上一步计算得到的髌关节的位置结合缩放比例即可求得机器人踝关节位置。求解方程:

$$\mathbf{P}_{2i} = \begin{bmatrix} S_{21} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{23} \end{bmatrix} \times (\mathbf{A}_i^P - \mathbf{H}_i^P). \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_i^R = \mathbf{H}_i^Z + \mathbf{P}_{2i}, i=1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

其中, $\mathbf{A}_i^R = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为第 i 帧的机器人骨骼踝关节位置数据; $\mathbf{A}_i^P = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为人体踝关节预处理后的第 i 帧的位置数据。

3.3 人形机器人运动学参数的提取

从3.2节几何缩放后得到的机器人踝、髌关节运动数据中提取出步长(l)、步幅(s)、步宽(w)、步高(S_h)、步态周期(T)、髌部波纹(H_w)、髌关节侧向摆动幅度(K)。其中,步幅等于2倍的步长^[11],将人体步态周期扩大 n 倍后得到 $T, n \in [4, 6]$ 。

4 人形机器人参数化轨迹规划

依照人体髌、踝关节的运动轨迹曲线并

结合机器人运动学参数进行机器人髌、踝关节参数化的轨迹规划。轨迹规划方式有正弦函数变上限积分等,通过对比各方法的优劣性,分析各方法轨迹规划结果与3.2节几何缩放后的关节运动数据之间的相似度,结果显示五次样条插值算法规划的关节运动轨迹的平均相似度为95%以上,因此选用该方法。

4.1 踝关节轨迹规划

采用五次样条插值算法计算摆动脚踝关节的运动轨迹。踝关节前进方向的运动轨迹多项式和约束条件分别为

$$Y_a(t) = a_6 t^5 + a_5 t^4 + a_4 t^3 + a_3 t^2 + a_2 t + a_1. \quad (9)$$

$$\begin{cases} Y_a(t_0) = 0, \dot{Y}_a(t_0) = 0; \\ Y_a(t_0 + nT) = n \times s, \dot{Y}_a(t_0 + nT) = v; \\ Y_a(t_0 + T) = s, \dot{Y}_a(t_0 + T) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

其中, $t \in [t_0, t_0 + T]; n \in (0, 1)$ 。

任取一个步态周期中的机器人运动参数,得到踝关节前进方向的轨迹多项式为

$$Y_a(t) = -0.0194t^5 + 0.4094t^4 - 3.0594t^3 + 8.5398t^2. \quad (11)$$

踝关节在竖直方向的运动轨迹分为上升期和下降期,约束条件分别为

$$\begin{cases} Z_a(t_0) = D_3, \dot{Z}_a(t_0 + nT) = 0; \\ Z_a(t_0 + nT) = s_h, \dot{Z}_a(t_0) = 0; \\ \dot{Z}_a(t_0) = 0, \ddot{Z}_a(t_0 + nT) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Z_a(t_0 + nT) = s_h, \dot{Z}_a(t_0 + T) = 0; \\ Z_a(t_0 + T) = D_3, \ddot{Z}_a(t_0 + nT) = 0; \\ \dot{Z}_a(t_0 + nT) = 0, \ddot{Z}_a(t_0 + T) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

其中, $n \in (0, 1)$ 。

则可得到运动轨迹曲线如图3所示,轨迹多项式见式(14)。

$$\begin{cases} Z_{a1}(t) = 0.0718t^5 - 0.6246t^4 + 1.4491t^3 + 4.519, \\ Z_{a2}(t) = -1.0371t^5 + 5.2893t^4 - 7.1935t^3 + 10.626. \end{cases} \quad (14)$$

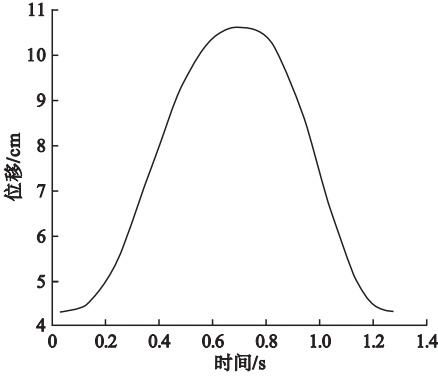


图3 踝关节在Z方向的轨迹曲线

Fig. 3 Ankle joint trajectory curve in Z direction

由图可知,机器人踝关节前进速度基本保持不变,摆动腿上升过程中,踝关节在竖直方向的运动速度为先增大后减少。

4.2 髋关节轨迹规划

将右髋关节在横向方向的运动分为三部分, t_0 时刻髋关节相对于起步前两髋关节中心点的距离为定值 f , 则可求解得到一个步行周期内的髋关节轨迹多项式:

$$\begin{cases} X_{b1}(t) = -0.006 4t^5 + 0.040 9t^4 - \\ 0.028 8t^3 - 0.093 8t^2 - 0.533 9t + 4.8, \\ X_{b2}(t) = 0.002 2t^5 - 0.035 8t^4 + \\ 0.152 9t^3 + 3.353 4, \\ X_{b3}(t) = -0.025 2t^5 + 0.211 4t^4 - \\ 0.489 4t^3 + 7.361 1. \end{cases} \quad (15)$$

髋关节 X 轴上的轨迹曲线如图 4 所示。

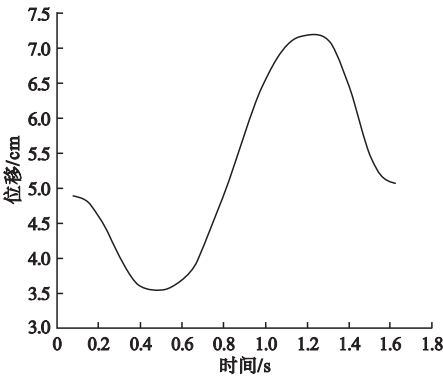


图4 髋关节在X方向的轨迹曲线

Fig. 4 Hip joint trajectory curve in X direction

右髋关节在前进和竖直方向轨迹曲线求取方法与踝关节类似。

5 人形机器人运动学参数优化

为了将机器人步行样本中的一组最优步态样本应用到机器人的步态规划当中,通过分析得出:机器人步行样本中的每个步态周期的运动学参数都不一致,影响机器人步态的主要参数有步长、步高等。因此,本节将使用优化算法获取最优步态样本,通过 3.3 节提取的运动学参数的边界范围如下:

$$\begin{cases} 10.29 \leq l \leq 23.85; \\ 2.3 \leq s_h \leq 6.4; \\ 1.14 \leq T \leq 2.72; \\ 2.86 \leq H_w \leq 5.38; \\ 6.56 \leq k \leq 9.15; \\ 9.3 \leq \eta \leq 28.3. \end{cases} \quad (16)$$

5.1 构造目标函数

(1) 稳定性函数

将支撑脚掌的区域作为稳定区域,将质心在地面的投影点到支撑脚的中心的距离作为目标函数,质心由髋关节位置表示,稳定性函数如下:

$$J_s = \sqrt{(x_c - x_f)^2 + (y_c - y_f)^2}. \quad (17)$$

其中, (x_c, y_c) 代表质心的位置; (x_f, y_f) 代表支撑脚的中心位置。

(2) 能量消耗函数

质心升高导致的能量消耗 E_1 的表达式如下:

$$E_1 = Mg(H_w + H_{ch} \sin(\eta + \alpha)). \quad (18)$$

其中, M 为机器人总质量; H_{ch} 为质心到髋关节的距离; 假设用线段 l_{ch} 连接髋关节与质心, 则 α 代表两髋关节的连线与线段 l_{ch} 的夹角。摆动腿抬升消耗的能量 E_2 表达式:

$$E_2 = mgs_h. \quad (19)$$

其中, m 为摆动腿的质量。

所以总体能耗 E 的目标函数表达式为

$$E = E_1 + E_2. \quad (20)$$

(3) 步行速度函数

步行速度是步长和步行周期的比值,将步行速度的倒数作为目标函数,表达式为

$$K = \frac{T}{2l}. \tag{21}$$

5.2 基于多目标粒子群的参数优化与仿真

多目标粒子群优化算法采用速度 - 位置模型,具有算法简单易实现等优点^[12]。针对优化目标,引入了 Skew Tent 混沌映射初始化种群^[13],以提高种群初始解分布的均匀性。

采用 Matlab 进行编程,设定 $N = 100$, $D = 6$, $T = 100$,种群搜索空间如式(16)所示。分析算法运行得到的目标函数值,发现若机器人在一个步态周期内具有较高的步行稳定性,则会以降低步行速度为代价。针对这种现象并结合本研究对机器人步行速度要求不高的情况,选取了一组最优的设计变量值。然后从机器人的步行样本中选出一组与最优设计变量相似度最高的参数作为机器人行走的运动学参数。选取运动学参数如下:
 $l = 10.4\text{ cm}$, $S_h = 3.8\text{ cm}$, $T = 2.1\text{ s}$, $H_w = 3.5\text{ cm}$, $k = 6.6\text{ cm}$, $\eta = 21.5^\circ$ 。

6 实验验证

6.1 逆运动学

将机器人运动学解耦为前向和侧向平面上。借鉴文献[14]的运动学模型建立思想,进行前向运动学建模时,忽略侧向运动的影响,在进行侧向运动学建模时,考虑前向运动腿部弯曲对其产生的影响^[14]。建立机器人运动学模型。参考文献[15]的逆运动学解析法。利用解析法对理想的机器人下肢关节运动轨迹进行逆运动学求解。

由于机器人的硬件限制,下肢各关节角度都有活动范围,因此逆运动学求解的关节角度应满足:

$$\theta_{imin} < \theta_i < \theta_{imax}. \tag{22}$$

其中, $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

若机器人的关节角度超出极限范围会对关节电机造成影响,所以针对异常的关节角

度应采用如下处理方式:

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_{imin}, & \text{if } \theta_i < \theta_{imin}; \\ \theta_i = \theta_{imax}, & \text{if } \theta_i > \theta_{imax}. \end{cases} \tag{23}$$

通过编写 python 语言代码求解得到机器人下肢各关节运动角度 θ_i ,图 5 为机器人右腿各关节的角度变化曲线。由图可知,右髋关节翻滚角和右踝关节翻滚角存在大小相等、方向相反的关系,这是由于在机器人侧向平面内,只有髋、踝关节的两个翻滚自由度,故行走中髋、踝关节翻滚角度轨迹变化曲线遵循上述关系。

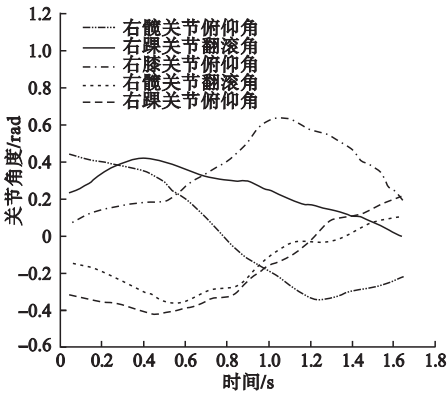


图 5 右腿各关节角度变化曲线

Fig. 5 Change curve of right leg joint angle

右髋关节俯仰角起初随着时间的变化而减小,是因为机器人右摆腿初始运动过程中,右大腿绕髋关节俯仰自由度做摆动,髋关节俯仰角度发生伸展,从而使摆动腿向前摆动。上述时间变化过程中,右膝关节俯仰角逐渐增大,是由于随着机器人摆动腿向前运动,膝关节俯仰角度发生屈曲,从而使摆动腿的离地高度逐渐增加。随着时间的变化,髋关节俯仰角度开始出现增大的趋势,是因为右摆动腿下落过程中,髋关节俯仰角度发生屈曲,使机器人右大腿高度降低。而这段时间变化过程中,膝关节俯仰角度开始逐渐减小,是为了使机器人摆动脚能够平稳着地,使机器人从右腿摆动状态过渡到右腿支撑状态,所以膝关节俯仰角度发生了伸展变化。机器人右踝关节俯仰角随着时间的变化先减小后增大,是因为机器人摆动腿的脚掌与地面始终

保持平行的状态,随着摆动腿的运动,踝关节俯仰角度先后发生伸展和屈曲,从而使机器人能够稳定的平脚着地。

6.2 基于虚拟 NAO 机器人的仿真实验

使用 NAO 提供的编程工具 Choregraphe 作为实验平台。在新建的指令盒内使用 python 语言编写驱动机器人行走的指令代码,将软件连接虚拟机器人并运行文件,让机器人按照规划的步态行走,实际运行状态如图 6 所示。从仿真效果来看,机器人可以实现稳定行走,说明步态规划合理可行。

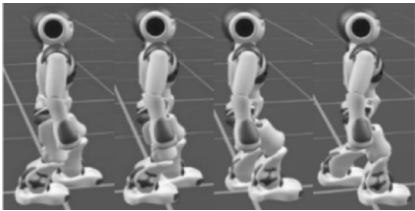


图 6 虚拟机器人行走仿真

Fig. 6 Walking simulation of virtual robot

6.3 基于 NAO 的物理样机实验

首先使用无线网络将物理样机与计算机相连接,然后在 Choregraphe 指令盒内调用 AL motion 模块中的 Angle Interpolation 并将关节角度序列编写到指令代码中驱动机器人行走。根据机器人行走过程中脚底压力传感器的位置和压力值计算出实际 ZMP 轨迹^[16],如图 7 所示。图中 ZMP 轨迹全部位于支撑多边形内部,在支撑区域中心附近发生小范围波动,但整体稳定裕度较大。

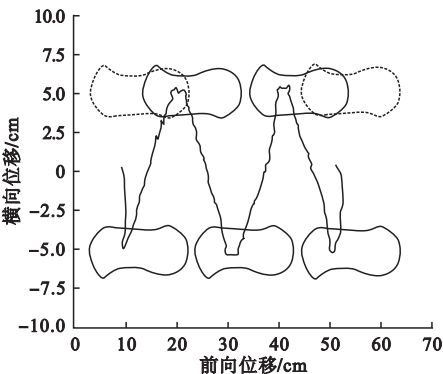


图 7 ZMP 轨迹曲线

Fig. 7 ZMP trajectory curve

图 8、图 9 分别为髋关节和踝关节的规划轨迹和仿真轨迹,选用 EDR 算法(编辑距离算法)判断两种轨迹曲线的相似性,结果显示相似度较高,由于规划的髋、踝关节轨迹与人体步行样本的平均相似度较高,间接表明仿真轨迹与人体步行样本具有较高相似性,反应出机器人行走步态的拟人特性。

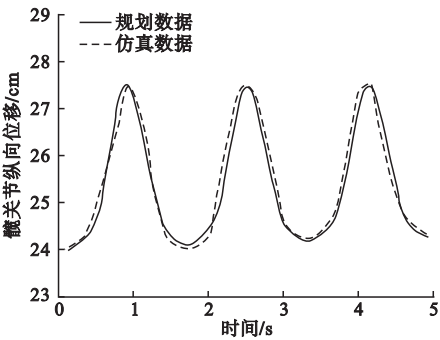


图 8 髋关节纵向位移对比

Fig. 8 of The longitudinal displacement comparison of hipjoint

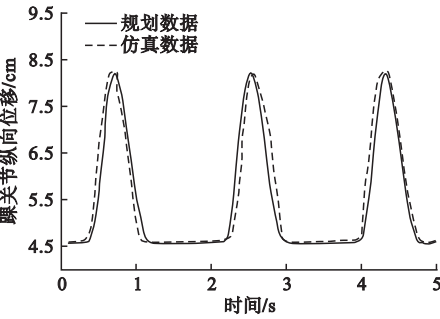


图 9 踝关节纵向位移对比

Fig. 9 The longitudinal displacement comparison of ankle joint

从实验结果来看,机器人可以按照规划的步态稳定行走,从而验证了步态规划和运动学参数优化的有效性,如图 10 所示。

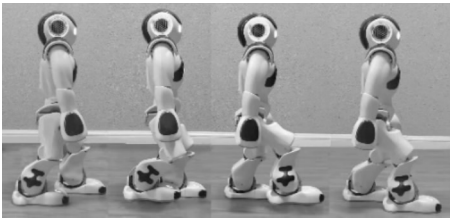


图 10 NAO 物理样机实验

Fig. 10 Physical prototype experiment of NAO

7 结 论

(1)对人体步行样本进行几何缩放,解决了机器人与人在肢体长度、几何配置等方面存在的差异,使人体运动轨迹映射到机器人的运动空间上。

(2)五次样条插值算法规划的参数化轨迹平均相似度为95%以上;使用多目标粒子群优化算法得到满足三个设定目标的最优运动学参数,使机器人获得能耗较低的行走步态,若机器人想拥有高稳态的步态,则步行速度会降低。

(3)在侧向平面内,随着机器人步态运动,髋、踝关节翻滚角度出现大小相等、方向相反的变化趋势;分析规划数据与仿真数据的相似性得出模仿人类步行的步态规划方法使机器人行走步态具有拟人特性。

参考文献

- [1] 隋振,于文成,田彦涛,等.基于线性倒立摆模型的双足机器人步态规划[J].吉林大学学报(信息科学版),2017,35(2):175-182.
(SUI Zhen, YU Wencheng, TIAN Yantao, et al. Gait planning of biped robot based on reference trajectory and COM balance [J]. Journal of Jilin university (information science edition), 2017, 35(2): 175-182.)
- [2] 王亚波.双足仿人机器人的步态规划及控制[D].西安:长安大学,2019.
(WANG Yabo. Gait planning and control of biped humanoid robot [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.)
- [3] 张月.双足人形机器人步态规划和稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
(ZHANG Yue. Gait planning and research on stability of biped humanoid robot [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2017.)
- [4] DONG E, WANG D, CHEN C, et al. Realization of biped robot gait planning based on NAO robot development platform [C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. [s. n.]: IEEE, 2016: 1073-1077.
- [5] 张博,杜志江,孙立宁,等.双足步行机器人步态规划方法研究[J].机械与电子,2008,4: 52-55.
(ZHANG Bo, DU Zhijiang, SUN Lining, et al. Research on gait planning of biped walking robot [J]. Machinery & electronics, 2008, 4: 52-55.)
- [6] 刘玉焘.基于可穿戴式传感器的人体动作捕获与识别研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
(LIU Yutao. Human motion capture and action recognition based on wearable sensors [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2020.)
- [7] 栗华.基于人体步行捕捉的双足机器人步行样本生成与实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工

业大学,2016.

- (LI Hua. Generation of biped robot's walking pattern and its experiment research based on human motion capturing [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2016.)
- [8] 罗继曼,郭松涛,印辉,等.管道机器人行走装置运动性能稳定性研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(6):1128-1136.
(LUO Jiman, GUO Songtao, YIN Hui, et al. Performance stability of pipeline robot walking device [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(6): 1128-1136.)
- [9] 吴伟国,栗华,高力扬.人体步行捕捉下的双足机器人跟随步行与实验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(1):21-29.
(WU Weiguo, LI Hua, GAO Liyang. Follow-walking motions of a biped robot and its experimental research based on human walking capturing [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017, 49(1): 21-29.)
- [10] 谢文军,陆劲挺,刘晓平.语义中间骨架驱动的自动异构运动重定向[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(5):750-762.
(XIE Wenjun, LU Jinteng, LIU Xiaoping. Automatic heterogeneous motion retargeting using semantic inter-mediate skeleton [J]. Journal of computer-aided design & computer graphics, 2016, 28(5): 750-762.)
- [11] 白桂峰.基于MEMS惯性传感器的人体步态分析关键技术研究[D].太原:中北大学,2020.
(BAI Guifeng. Research on key techniques of human gait analysis based on MEMS inertial sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.)
- [12] 袁锦涛,刘军,邹树梁.基于粒子群算法的工业机器人多目标最优轨迹规划[J].工业仪表与自动化装置,2021(5):73-79.
(YUAN Jintao, LIU Jun, ZOU Shuliang. Multi objective optimal trajectory planning of industrial robot based on particle swarm optimization [J]. Industrial instrumentation & automation, 2021(5): 73-79.)
- [13] 江善和,王其申,江巨浪.一种新型 Skew Tent 映射的混沌混合优化算法[J].控制理论与应用,2007,24(2):269-273.
(JIANG Shanhe, WANG Qishen, JIANG Julang. Chaotic hybrid optimization algorithm of a new Skew Tent map [J]. Control theory & applications, 2007, 24(2): 269-273.)
- [14] 张志宏.双足机器人快速在线步态切换及其实验[D].杭州:浙江大学,2017.
(ZHANG Zhihong. Fast online gait transition for biped robot and its experiments [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.)
- [15] 王凡,李龙澍.实时解析法在NAO模型运动学求解中的应用[J].计算机应用,2011,31(10):2825-2827.
(WANG Fan, LI Longshu. Application of real-time analytical method in inverse kinematics of NAO model [J]. Computer applications 2011, 31(10): 2825-2827.)
- [16] 王南.人形机器人运动控制研究[D].北京:华北电力大学,2016.
(WANG Nan. Research on motion control for humanoid robot [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)