**五、控制策略设计与仿真**

**5.1 基于粒子群优化算法的机器人下肢关节位置跟踪控制**

在本文的动力学分析中，机器人下肢的关节力矩由PD轨迹跟踪的控制方法实现: 即以机器人期望轨迹与实际轨迹的差值为PD控制的比例项，使用差分近似导数的方法构成控制中的微分项。具体地，基于PD控制算法的机器人关节力矩可以表示为



其中，为关节的力矩，分别表示右侧髋关节、右侧膝关节、右侧踝关节、左侧髋关节、左侧膝关节、左侧踝关节；、为比例和微分增益，和分别表示了当前时刻下关节的位置误差和速度误差。期望轨迹的值由人体实测行走过程中的下肢关节运动数据提供。

为体现机器人对环境的自适应性，PD控制的参数和不采用固定值，而是通过具有出色搜索能力的启发式算法自适应地调节。具体地，本研究选取粒子群优化算法来确定PD参数以达到自适应生成机器人关节力矩的目的。这是因为其能够在没有得知太多问题信息的情况下，有效地搜索庞大的解空间。

粒子群优化（Particle Swarm Optimization, PSO）是一种基于群体智能的搜索算法，通过模拟粒子在多维空间内的运动，来寻找全局最优解。算法的基本思想是，假设有一群粒子在多维空间内飞行，每个粒子代表一种可能的解，它们通过向着全局最优解和个体最优解的方向运动来改善自己的位置。在每一步迭代中，粒子根据全局最优解和个体最优解的位置来更新自己的速度和位置，并不断尝试寻找更优解。粒子群优化算法具有许多优秀的特性，如全局搜索能力强、对初始解不敏感、适用于高维空间等。然而，由于粒子群算法存在种群收敛性差的问题，因此需要通过一些技巧来提高其全局搜索能力和收敛性。

基于粒子群优化算法和PD轨迹跟踪控制生成机器人关节力矩的流程如下图所示，粒子群优化算法的参数列于下表。其中，为粒子维度，即待优化PD控制参数的维度，前6维为参数，后6维为参数; 为种群规模，为总迭代次数，根据仿真所需时间给定; 为惯性权重，体现了粒子保持前一运动状态的能力; 为当前迭代次数，和为个体学习因子和群体学习因子，用于调节学习最大步长。



图 基于粒子群优化的机器人关节力矩PD控制流程

表 粒子群优化算法参数值

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数 |  |  |  |  |  |  |
| 取值 | 12 | 100 | 50 | 1 | 2 | 2 |

本研究中，动力学数值计算通过欧拉法实现，计算步长设为0.1 ms，每个粒子的作用时间为2 ms。粒子群优化算法中速度更新和位置更新公式如下:

 (29)

 (30)

其中，为第次迭代中粒子的速度矢量，为第次迭代中粒子的位置矢量，和为区间内的随机数。为粒子的当前个体最优位置矢量，为整个粒子群的当前全局最优位置矢量。、的引入增加了种群搜索的随机性，提升了粒子群算法避免陷入局部最优的能力。

粒子群优化的损失函数定义为:

 (31)

其中，和为位置误差和速度误差的权重，损失函数表征了在时刻系统位置和速度的平均累计误差。

基于前面控制框图的具体流程如下: 根据每个粒子当前的位置生成机器人各个关节的力矩并作用于动力学模型，每个粒子的作用时间为2 ms，计算当前的损失函数并与之前的损失函数进行比较，确定并更新该粒子的个体最优位置和粒子群的全局最优位置。当个粒子依次执行完2 ms(共计0.2 s)后，基于当前的个体最优位置和当前全局最优位置，利用式(29)和(30)更新每个粒子的位置和速度，并开始下一轮迭代。上述算法可以在机器人行走的过程中，不断地迭代关节PD控制的参数，从而实现快速实时调优；同时，该算法具有较好的收敛性和在线性，随着迭代次数的增加，损失函数将很快收敛到最小值。

**5.2 机器人期望轨迹数据采集与处理**

期望轨迹的值由人体实测行走过程中的下肢关节运动数据提供。人体下肢关节运动学的测量目前主要采用三维动作捕捉系统，通过环绕在实验场地的红外相机捕捉粘贴在人体表面的反光标几点可以精确得到其运动轨迹、速度、加速度等，配合人体多刚体骨骼模型，即可得到关节运动，具有稳定性好、采样率高、精度高等优点。

本项研究招募了1名男性受试者（25岁，180 cm）参与实验。受试者测试系统四周安装有12个红外相机（MARS4H，北京度量科技有限公司），采样速率100 Hz。实验过程中，受试者身上粘贴标记点，在跑台上以1.0 m/s的速度行走1 min，取最后10 s作为采样区间。所测量的标记点轨迹在动作捕捉系统软件中进行插值与平滑处理，随后导入到OpenSim 4.4 开源生物力学软件中进行逆运动学计算，进而得到受试者行走时的下肢髋、膝、踝关节在矢状面内的关节角度。以受试者的左侧腿为例，实测髋、膝、踝关节的在10 s内的关节运动弧度（左列）和角速度（右列）如图所示。其中，关节角度轨迹将作为机器人运动时的期望轨迹，指导下肢各关节电机产生力矩，进而驱动机器人在一定速度下实现平稳行走。



图 人体实测下肢运动轨迹

**5.3 基于粒子群实时参数优化的机器人行走动力学仿真结果**

为验证所建立的双足机器人动力学模型的有效性，并评估粒子群实时优化方法用于机器人关节控制参数调优的能力，我们通过对双足机器人动力学模型、关节电机PD控制策略及粒子群实时参数优化方法进行了代码实现和动力学仿真。每个粒子所包含的各关节PD控制参数均限幅在，且在可行域内进行随机初始化；仿真环境中，机器人各刚体部分的长度、质量、质心和惯性矩阵等属性与其对应的SOLIDWORKS模型参数保持一致。仿真的框架搭建及数值计算均在MATLAB R2024a中进行，行走仿真总时长10 s，动力学过程求解固定步长0.1 ms。仿真优化过程在个人台式机（Intel Core i7-12700, 2.1 GHz, 16 GB RAM）中进行，共用时73.57 s。

下图展示了机器人动力学模型行走仿真的关节运动弧度（左列）和角速度（右列）与期望轨迹的对比结果。其中，绿色虚线为动力学仿真下的机器人关节运动轨迹，红色实现为实测人体运动轨迹，即机器人关节运动的期望轨迹。从关节运动弧度（左列）数据来看，机器人的关节运动能够几乎完全贴合期望轨迹；从关节运动速度（右列）数据来看，尽管机器人的关节运动角速度同样能够贴合人体实测的下肢运动速度数据。注意到实测速度轨迹由于测量误差、计算误差等缘故，存在较严重的毛刺，与人体实际的运动情况差距较大；而基于PD控制的机器人能够在贴合关节运动曲线的情况下，同时忽略一定程度的运动噪声干扰，从而实现更加自然、稳定的行走运动。



下图以左侧髋关节电机的PD控制参数为例，展示了在粒子群参数实时优化下的比例参数*KP*和微分参数*KD*随仿真时间的变化情况。可以看到在仿真开始的前3 s内，髋关节的电机的控制参数波动还比较大，这一方面是由于作为机器人关节期望轨迹的人体实测下肢关节运动在前3 s存在较大波动，这一点从上图右列的期望关节速度轨迹曲线中可以看出；另一方面是由于粒子在优化初期尚处于探索阶段，参数取值的多样性较大。在仿真的第2 ~ 3 s间，全局最优位置以基本确定，种群内的各个粒子开始向全局最优点移动；3 s后，几乎所有粒子已到达全局最优点，整个种群趋于稳定。该结果也反映了基于粒子群实时参数优化方法能够有效找到控制参数的全局最优解，并且能够在较短时间内快速收敛。

