

# 基于大数据聚类的机器人步态控制系统设计

李莹, 申丽芳

(沈阳工学院 信息与控制学院, 辽宁 抚顺 113122)

**摘要:** 为提高机器人关节的运动灵活性, 使其具有更快、更稳的步行能力, 设计基于大数据聚类的机器人步态控制系统; 通过传感器设备为主处理器元件、舵机控制板提供足量的传输电信号, 完成机器人步态控制系统硬件设计; 定义关键的关节节点, 通过建立适应度函数的方式, 实现基于大数据聚类的步态节点安排; 分别从支撑腿运动规划、摆动腿运动规划两方面着手, 收集大量的步态运动信息, 再联合已知函数条件, 对机器人关节角度进行求解, 完成机器人行进步态的规划与处理, 实现基于大数据聚类机器人步态控制系统的应用; 实验将所得关节弯曲次数、角度值与理想数值对比可知, 所设计系统位姿标定情况下关节弯曲次数值大、角度值小, 机器人关节的运动灵活性水平高, 具有相对稳定的步行运动能力。

**关键词:** 大数据聚类; 机器人; 步态控制; 适应度函数; 支撑腿; 摆动腿; 关节角度

## Design of Robot Gait Control System Based on Big Data Clustering

LI Ying, SHEN Lifang

(School of Information and Control, Shenyang Institute of technology, fushun 113122, China)

**Abstract:** In order to improve the mobility of robot joints and make them have a faster and more stable walking ability, a robot gait control system based on big data clustering is designed. Combined the external main power supply and the sensor equipment, the main processor element and the steering gear control board provide the sufficient transmission electrical signals to complete the hardware design of the robot gait control system. Key joint nodes are defined, and the gait node arrangement based on big data clustering is realized by establishing fitness function. Based on the gait planning of supporting leg and swinging leg, a large amount of gait information is collected, as connected to the known function conditions, and the joint angle of the robot is calculated to realize the gait control system. Compared with the ideal value, the result shows that the designed system has the advantages of large number of bending, small angle, high flexibility and relatively stable walking ability.

**Keywords:** big data clustering; robot; gait control; fitness function; support leg; swing leg; joint angle

## 0 引言

针对于定向性信息来说, 大数据具有快速增长的变化能力, 且其从属复杂度也会随网络环境的改变而产生变化。大数据可以看作是当数据规模扩大到一定程度后而产生的信息量质变行为, 同时包含多种数据信息类型, 不但涉及文字、图像等传统的结构化信息, 也包含声音、视频等连续的新型非结构化信息, 且与其他类型的数据参量相比, 大数据在传输时间方面的应用要求更高<sup>[1-2]</sup>。从范围空间的角度来看, 大数据信息以整个互联网空间作为提取背景, 特别是针对运动学等应用问题来说, 大数据参量所能提供的参考信息更多, 不仅能够保障相关函数公式定义的运算有效性, 也可实现对数据统计环境的较好完善<sup>[3]</sup>。

传统机器人步态控制系统已经应用于实际工作中, 例如文献 [4] 提出逆运动学控制系统, 在硬件方面采用 TMS320VC5509A 设备作为设计核心, 结合测距传感器、压力传感器、惯性传感器等元件对步态数据的采集时序进行实时控制, 再通过姿态解算的方式, 确定运动过程中的

角度与速度数值。然而此系统所标定的机器人行为位姿角度过大, 易使其关节灵活性受到影响, 从而使得机器人步行能力受到影响。文献 [5] 提出基于电容式触觉传感器的机器人步态控制系统, 利用电容式触觉传感器采集测量参数, 包括机器人运动峰值法向力的大小和时间, 以及腿部旋转速度, 当机器人穿越不同类型的地形时, 传感器会测量接触力, 基于步态性能研究, 通过实时地形分类实现了基于地形的步态控制。该系统位姿标定较为准确, 但机器人步态控制的运动灵活性水平较差。

针对此问题, 引入大数据聚类思想, 设计新型的机器人步态控制系统, 利用舵机控制板、传感器电路等设备元件, 规划机器人支撑腿、摆动腿的瞬时运动行为, 再结合聚类算法的适应度函数条件, 实现对关节角度的计算与求解。

## 1 机器人步态控制系统总体设计方案

机器人步态控制系统的总体设计应从传感器设备、主处理器元件、舵机控制板 3 个角度同时进行, 具体操作方法如下。

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-25。

基金项目: 辽宁省中央引导地方科技发展资金沈抚示范区本级科技计划项目(2021JH6/10500137)。

作者简介: 李莹(1982-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士, 副教授, 主要从事数据库管理系统方向的研究。

引用格式: 李莹, 申丽芳. 基于大数据聚类的机器人步态控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 95-99.

## 1.1 传感器设备

为了完成对机器人行走步态位姿的实时修正与控制,需要不断获取机器人行为及其所处周围环境的具体信息,在此过程中,传感器设备起到了至关重要的调节作用,且只有在多级传感器元件的共同配合之下,才能实现对机器人步态信息的按需处理<sup>[6]</sup>。利用九轴传感器采集机器人步态位姿信息,结合压力元件了解足底与地面之间的接触情况,再通过大数据聚类算法将已获取的信息发送给下级舵机控制板设备。

### 1) 九轴传感器:

MPU9250 是九轴传感器的核心组成元件,如图 1 所示,由两部分应用结构共同组成。其中一组为单独的 3 轴磁力计,另一组为 3 轴加速度计与陀螺仪的连接组合。这种传感设备的物理体积较为小巧,拥有 SPI、IIC 两种最基本的数据通信方式。

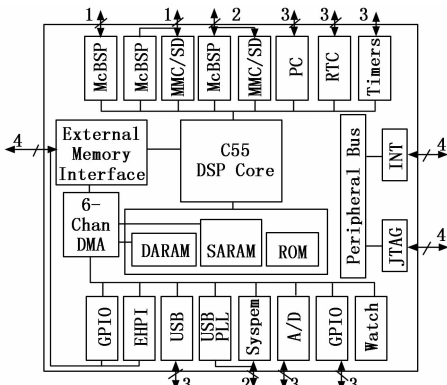


图 1 TMS320VC5509A 的结构框图

传感器内部具有完整的 16 位 ADC,对于数据型电量输出信号来说,元件结构为其匹配的可测量范围相对较为广泛。机器人步态控制系统利用 IIC 总线读取 MPU9250 中的存储数据信息,主要引脚功能如表 1 所示。

表 1 MPU9250 引脚功能

引脚	功能
ADO	从机地址选择
VCC	3.3 V 电源
FSYNC	步态运动信号,不使用时直接接地
GND	地线
INT	控制中断信号
SCL	时钟控制信号
SDA	运动数据信号
NCS	步态数据精选

### 2) 红外测距传感器:

红外测距传感器安装于机器人头部舵机中,可通过舵机的转动自测来判断机器人前方运动范围内是否具有障碍物<sup>[7]</sup>。传感器元件的应用遵循三角测量原理,根据障碍物所处位置的不同,所发出测距信号的返回接收位置也有所不同。

### 3) 压力传感器:

压力传感器外附着一层电阻式薄膜,可用来判断机器人在运动过程中脚底是否与地面接触,具有重量级轻、体积小应用优点。

## 1.2 主处理器元件

考虑到机器人步态控制系统的响应与集成要求,应选择 TMS320VC5509A 作为主处理器元件的核心应用芯片,如图 1 所示。TMS320VC5509A 芯片可将信息转化为数字传输信号,并对其后续的传递与处理,具有相对高速的应用特点。External Memory Interface 主操控结构可通过片选信号的方式,对隶属于芯片外部的存储空间进行选用,且由于 GPIO、EHPI、Sysmem、McBSP、RTC 等多个接口的同时存在,控制系统主处理器元件可直接将舵机控制板由同步状态调制至异步状态,也可实现反向调制<sup>[8-9]</sup>。

从宏观性角度来看,主处理器元件的应用优点主要表现在如下几个方面。

1) 集成性能良好:主处理器元件内集成了多组信号通讯模块,可在主电源支持下,实现由机器人步态控制数据到控制信号的转换。

2) 运行速度较快:C55 DSP Core 芯片可快速采集机器人步态行进指令,且大多数指令都可在同一信号处理周期内完成调整,因此主处理器元件可对机器人前进行为进行有效的中断控制。

3) 稳定能力强、运算精度高:在主处理器元件中,TMS320VC5509A 芯片通常都拥有独立的高精度并行乘法器设备与之配套,且所有与机器人步态行为相关的指令都是针对该模块专门设计的。

4) 接口覆盖量大:为便于与下级控制设备建立稳定的连接关系,主处理器元件设置 6-Chan DMA、INT、JTAG 等多个接口组织,在机器人运行过程中,这些接口同时接受 C55 DSP Core 主芯片的调度,因此其应用能力始终保持高度的一致性。

## 1.3 舵机控制板

单纯的 TMS320VC5509A 芯片在机器人步态控制方面的应用能力较为薄弱,若将其直接与 19 路舵机关联起来,则会显得机器人的前进步态过于不稳定<sup>[10]</sup>。因此,在新型机器人步态控制系统中,将驱动舵机的任务分配给了应用级别更高的舵机控制板元件,当使用 DSP 指令发送模式时,舵机板可代替独立的 19 路舵机对信号传输行为进行控制,从而形成一种完整的“两级”连接结构,其电路原理图如图 2 所示。

SSC-32U 以 ATmega328 作为主控元件,在接收到上位机控制指令后,可以对下级舵机设备进行同步驱动,与 TMS320VC5509A 芯片相比,其负载能力更强,在作用过程中,不限制舵机设备的实际连接形式。由于 ATmega328 元件的存在,整个 SSC-32U 芯片外部的驱动电压始终保持为稳定数值<sup>[11]</sup>。针对于机器人步行运动来说,SSC-32U 型舵机控制板输出的信号数据同时包含舵机角度、转动时间

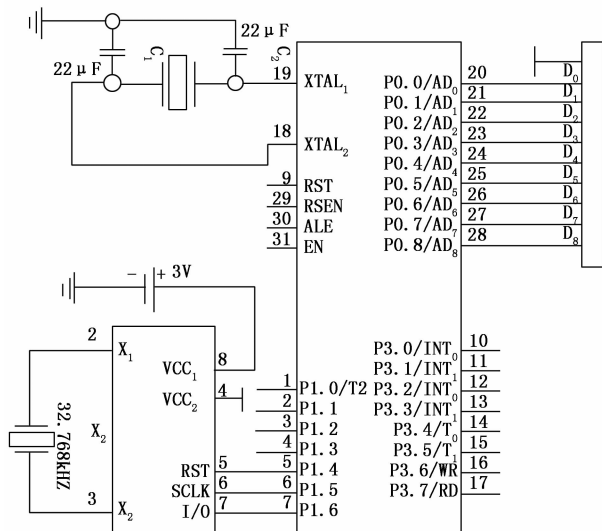


图 2 SSC-32U 型舵机控制板原理图

的物理信息。一般情况下, 各个关节的运动与停止能够保持高度统一的状态, 但若仅改变一个关节的运动角度数值, 通过操作舵机控制板也是可以实现的。

## 2 基于大数据聚类的步态节点安排

按照机器人步态控制系统设计方案, 通过定义关键节点的方式, 建立关键的适应度函数条件, 完成基于大数据聚类的机器人步态节点安排。

### 2.1 大数据聚类关键节点定义

在互联网环境中, 关键聚类节点有两种表现形式, 一种是通过破坏原节点, 推断网络受到的影响, 一般来说影响能力越大, 代表该节点越重要; 另一种是通过分析节点密度等特性来反映网络的重要性能力, 并通过扩大原节点显著性等级的方式, 来判断该节点是否为关键聚类节点。在机器人步态控制系统中, 网络大数据聚类需要消耗大量的处理时间, 因此可作为定义关键节点的重要物理指标<sup>[12-13]</sup>。为实现对机器人步态行为的最大化调度, 默认所有关键节点都处在互联网中部, 且为使定义时间长度得到有效控制, 应将大数据聚类看作一种简单的数据信息堆叠行为, 且随着待处理数据量的增大, 聚类堆叠的处理层数值也会不断增大。设  $e_{\min}$  代表最小的信息聚类系数,  $e_{\max}$  代表最大的信息聚类系数, 在机器人行进步数为  $n$  的条件下, 可将关键大数据聚类节点表达式定义为:

$$q = \frac{\sum_{e_{\min}}^{e_{\max}} f(\alpha_n - \alpha_1)^2}{n \times \Delta T} \quad (1)$$

其中:  $\alpha_1$  表示第一个行进步态指标,  $\alpha_n$  表示第  $n$  个行进步态指标,  $f$  表示聚类节点筛查条件,  $\Delta T$  表示聚类节点的单位筛查时长。

### 2.2 适应度函数

适应度函数对大数据聚类算法起到了极强约束作用, 可根据关键节点定义条件, 规划步态节点在后续运动过程

中所处的分布位置, 从而为机器人选取一条相对可靠的行进路线。受到舵机控制板元件的影响, 适应度函数作用能力应呈现范围式存在状态, 即在固定运动区域环境中, 由于适应度函数的存在, 机器人前进步态不会与预设情况出现较大偏差<sup>[14-15]</sup>。设  $L$  代表固定运动区域的面积数值,  $h$  代表机器人前进长度,  $d$  代表机器人支撑腿与摆动腿之间的物理宽度值, 联立公式 (1), 可将大数据聚类算法的适应度函数条件定义为:

$$I = \frac{\lambda \cdot k^2}{L \operatorname{sech}\left(\frac{\sqrt{d \times h}}{E}\right)} \beta t \quad (2)$$

式中,  $\operatorname{sech}$  表示双曲函数,  $\lambda$  表示聚类约束标准,  $k$  表示大数据聚类的处理基向量,  $E$  表示范围化聚类系数,  $\beta$  表示与舵机板元件匹配的机器人步态控制系数,  $\bar{q}$  表示步态控制量均值。

## 3 机器人行进步态规划

### 3.1 支撑腿运动规划

设  $t$  代表一个机器人步态运行周期的消耗时长。在前  $\frac{t}{2}$  时间内, 若机器人出现右倾行为, 则判定右腿作为支撑腿、左腿作为摆动腿。根据机器人自身的结构特点可知, 应采用大数据聚类算法对其脚步与小腿连接位置进行力学分析<sup>[16-17]</sup>。为使机器人在  $X$  轴方向上保持平稳运动, 避免产生不必要的外部冲击力, 可将机器人力学质心在运行平面内的变化轨迹等效成为完整的正弦曲线, 规定质心在出现偏移方向变化时的速度初始值为 0。联立公式 (2), 可将机器人支撑腿的运动规划方程表示为:

$$\begin{cases} x_1 = I \left[ \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right) + 1 \right] \\ y_1 = C_1 I^m + C_2 I^m \\ z_1 = I^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $x_1$  表示机器人步态行为在  $X$  轴上的分量,  $y_1$  表示机器人步态行为在  $Y$  轴上的分量,  $z_1$  表示机器人步态行为在  $Z$  轴上的分量,  $C_1, C_2$  表示两个不同的步态行进系数。

### 3.2 摆动腿运动规划

在后  $\frac{t}{2}$  时间内, 若机器人出现左倾行为, 则判定左腿作为支撑腿、右腿作为摆动腿。同理, 可将机器人摆动腿的运动规划方程表示为:

$$\begin{cases} x_2 = I \left[ \sin\left(\frac{\pi t}{4}\right) + 1 \right] \\ y_2 = \frac{C_1 I^m + C_2 I^m}{(C_1 + C_2)^2} \\ z_2 = I^4 \end{cases} \quad (4)$$

### 3.3 关节角度求解

在步态行进坐标系内, 由机器人自身结构特点及先前所规划的腿部步态行为可知,  $\theta_1, \theta_3$  为侧向关键的旋转角数值, 只能在  $X-Z$  的平面环境中变化,  $\theta_2, \theta_3, \theta_4$  则为前向关

键旋转角数值, 如图 3 所示。

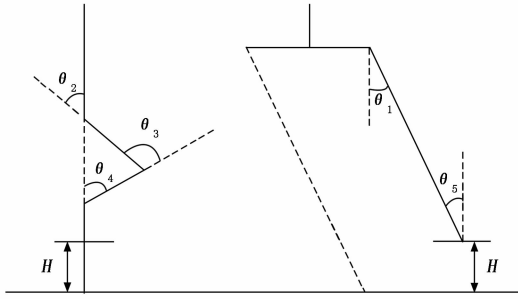


图 3 机器人腿部各关节变化角度的定义

联合公式 (3)、公式 (4), 根据行进速度  $v = (x_i, y_i, z_i)$  和几何关系, 写出各关节角度变化的方程如下:

$$\begin{cases} |\theta_1| = \frac{\arccos |z_1 - z_2|}{v^2} \\ |\theta_2| = \frac{\arccos |z_1 - z_2|}{z_i^2} \\ |\theta_3| = \frac{\arccos |(x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_2)|}{v^3} \\ |\theta_4| = \arccos \left| \frac{(y_1 - y_2)}{y_i^2} \right| \\ |\theta_5| = \arccos \left| \frac{(y_1 - y_2)}{(y_1 - y_2)^2} \right| \end{cases} \quad (5)$$

对机器人支撑腿有  $\theta_2 > 0, \theta_3 < 0, \theta_4 > 0$ , 对机器人摆动腿有  $\theta_1 > 0, \theta_5 < 0$ 。至此, 完成对机器人行进步态的规划与处理, 在大数据聚类算法的支持下, 实现机器人步态控制系统的顺利应用。

#### 4 实例分析

分别采用文献 [4] 系统、所设计系统对机器人基本位姿进行标定, 机器人步行参数如表 2 所示。

表 2 机器人步行参数

参数	最大抬脚高度	质心高度	步长	周期
量值	30 mm	230 mm	50 mm	3 s

将机器人放在平整的地面上, 让其按照所规划路径做步行前进运动, 并参照表 2 来设置机器人的最大抬脚高度、质心高度、步长与周期, 然后让机器人连续步行前进 10 米, 期间机器人的步态行为稳定且平滑, 没有出现明显的晃动状态, 此期间所捕捉到的机器人平地运动截图如图 4 所示。

为更准确检验机器人在平地的步行状态, 读取两种系统控制下机器人的关节弯曲次数, 并将其与理想数值对比, 如图 5、图 6 所示。

对比图 5、图 6 可知, 在行进过程中, 机器人步态每变化一次, 其关节弯曲量都会由 0 直接变化至当前的最大值结果, 因此在两次前进行为之间, 关节弯曲次数都会呈现短暂的“归零”状态。所设计系统数值曲线与理想数值曲线相比, 并没有过于明显的出入, 在前 2 米的前进距离中,

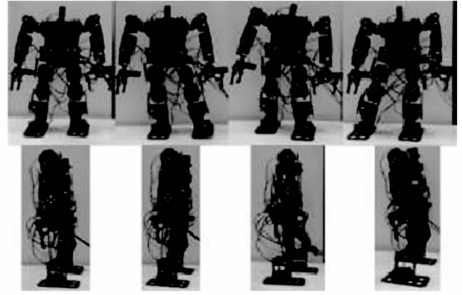


图 4 机器人平地步行运动截图

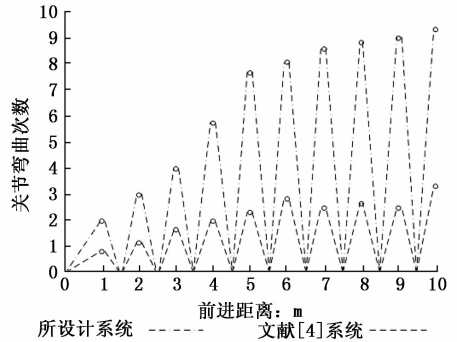


图 5 所设计系统、文献 [4] 系统关节弯曲次数

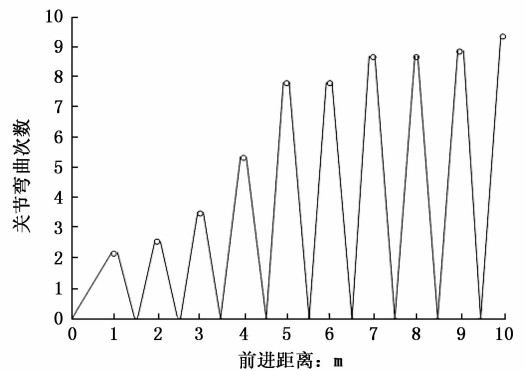


图 6 关节弯曲次数理想数值

所设计系统关节弯曲次数量小幅高于理想数值, 当前进距离为 6 m 和 8 m 时, 理想数值出现了两次较小的下降状态, 但所设计系统关节弯曲次数在整个实验过程中, 始终保持不断上升的变化状态, 只是实验后期上升幅度相对小于实验前期。文献 [4] 系统数值曲线与理想数值曲线相比, 在既定节点处的数值水平明显更低, 当前进距离为 7 m 和 9 m 时, 文献 [4] 系统关节弯曲次数出现了两次较小幅度的下降状态, 实际变化趋势也与理想数值不完全一致。

将机器人放在不平整的地面上, 让其按照所规划路径做步行前进运动, 结合传感器反馈回来的姿态信息确定机器人关节弯曲角度的实际变化情况。参照表 2 来设置机器人的最大抬脚高度、质心高度、步长与周期, 然后让机器人连续步行前进 10 米, 在此期间及时调整机器人步态行为使其保持稳定且平滑的状态, 具体所捕捉到的机器人运动截图如图 7 所示。

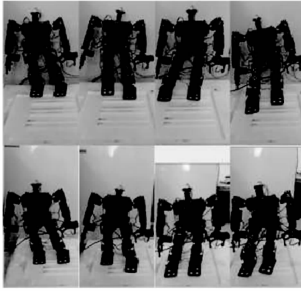


图7 机器人不平整地面步行运动截图

读取所设计系统、文献[4]系统机器人的关节弯曲角度数值,并将其与理想数值对比,如表3所示。

表3 关节弯曲角度对比结果

前进距离/m	所设计系统关节弯曲角度/(°)	文献[4]系统关节弯曲角度/(°)	理想数值/(°)
1	50.1	91.8	65.7
2	50.2	90.6	65.9
3	50.3	91.4	66.2
4	50.4	91.5	66.4
5	50.5	90.3	66.8
6	60.4	115.6	70.3
7	60.2	115.9	71.6
8	60.5	115.7	72.5
9	60.3	115.8	73.2
10	60.1	115.6	73.5

在机器人行进过程中,关节角度的弯曲数值越小,代表机器人的运动灵活性越强,且当其弯曲度超过 $110^\circ$ 时,机器人的前进步态会出现明显的迟缓状态。以前进距离等于5m作为分界点,分析表3可知,所设计系统关节弯曲角度与理想数值在分界节点之前,均保持不断上升的数值变化趋势,但所设计系统数值的上升幅度明显小于理想数值,平均值水平也相对更低;文献[4]系统关节弯曲角度在分界节点之前的变化行为并没有明显规律,且其均值水平也远高于理想数值与所设计系统数值。在分界节点之后,理想弯曲角度均值出现了明显提升,与所设计系统数值相比其上升幅度更为明显,但也并未超过最大弯曲数值 $110^\circ$ ;文献[4]系统关节弯曲角度的上升幅度比理想数值更为明显,且其均值水平也超过了 $110^\circ$ ,对机器人的稳定步行前进起到了一定的抑制作用。

综上所述,大数据聚类型控制系统在稳定机器人前行步态方面具有较强的促进作用,在前进等长距离的情况下,机器人关节的弯曲次数大而弯曲角数值小,充分说明了在前进过程中,机器人关节确实具备较强的运动灵活性。

## 5 结束语

为了更好地适应大数据聚类算法的应用需求,机器人步态控制系统针对提高机器人关节运动灵活性的问题展开了研究,联合传感器设备、舵机控制板等应用元件,规划支撑腿、摆动腿的实际运动行为,再借助适应度函数,求解

关键的关节角度数值。实验方面从位姿标定的角度着手,分析关节弯曲次数与弯曲角度的具体变化情况,与传统逆运动学控制系统相比,大数据聚类系统对于机器人关节运动灵活性的促进作用更强,可对其稳定步行运动能力提供强有力的保障。

## 参考文献:

- [1] 孙倩,陈昊,李超.基于改进人工蜂群算法与MapReduce的大数据聚类算法[J].计算机应用研究,2020,37(6):1707-1710.
- [2] 王万良,张兆娟,高楠,等.基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展[J].计算机集成制造系统,2019,25(3):529-547.
- [3] 李廷华,朱东来,韩熠,等.一种SAW电子烟雾化芯片驱动控制电路设计与实现[J].电子技术应用,2019,45(3):113-117.
- [4] 桑宏强,张文刚,刘芬.微创手术机器人主从运动控制系统设计[J].控制工程,2020,27(4):131-137.
- [5] WU X A, HUH T M, SABIN A, et al. Tactile Sensing and Terrain-Based Gait Control for Small Legged Robots [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2019 (99): 1-13.
- [6] 曾进辉,孙志峰,雷敏,等.独立输入并联输出双有源全桥DC-DC变换器无电流传感器均流控制[J].中国电机工程学报,2019,39(7):2144-2155.
- [7] 胡冰,张利军,崔晓光,等.基于改进电压模型的感应电机无速度传感器矢量控制[J].微特电机,2020,48(2):34-37.
- [8] 何豪,宋兴国,曹中清,等.六足机器人攀爬楼梯的路径优化步态控制[J].信息与控制,2020,49(6):688-696,707.
- [9] 张浩昱,熊凯.基于近端策略优化算法的四足机器人步态控制研究[J].空间控制技术与应用,2019,45(3):53-58.
- [10] 李婷,王新民,杨婷,等.基于速度观测的双余度电液舵机系统容错同步控制[J].北京航空航天大学学报,2020,46(10):1929-1940.
- [11] 杨阳,杨超,吴志刚.基于舵机动态特性测试的阵风减缓控制系统设计[J].振动与冲击,2020,39(4):106-112.
- [12] 康耀龙,张景安,冯丽露.基于约束满足的大数据聚类中心调度算法仿真[J].计算机仿真,2020,37(3):385-388.
- [13] 孙倩,陈昊,李超.基于改进人工蜂群算法与MapReduce的大数据聚类算法[J].计算机应用研究,2020,37(6):1707-1710.
- [14] 杨旭,邱明,陈立海,等.基于PSO-RWE的自适应小波阈值函数滚动轴承振动信号去噪方法[J].航空动力学报,2020,35(11):2339-2347.
- [15] 龚兰,石荷叶,张建.标准操作程序在达芬奇机器人手术器械清洗流程中的应用[J].养生保健指南,2020(11):10-11.
- [16] 郭绍宁,黄金玲,王伟,等.右美托咪啶对老年患者在机器人辅助腹腔镜手术麻醉苏醒期及术后认知功能的影响[J].饮食保健,2020,7(22):72-73.
- [17] 冯海兵,金振林,赵裕明.一种新型摆桨式腿部机构运动学及工作空间分析[J].机械设计,2020,37(4):37-44.