

# 基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备 信息控制模型

程晓芳

(陕西国防工业职业技术学院, 西安 710300)

**摘要:** 针对可穿戴人机交互设备信息控制, 采用传统控制模型易受行为抖动影响, 导致控制效率较低, 为了解决该问题, 提出了基于惯性传感器控制模型; 通过测量变形量分析外界作用力下惯性传感器内部敏感元件变形情况, 以此作为人机交互空间, 在该空间内对表面行为和混合行为进行统一处理, 并设计连续交互空间分层处理流程; 根据分层处理结果, 研究具体传感阶段和控制步骤, 通过分析不同阶段时间, 可有效控制基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备信息; 经过防抖处理, 可改善传统模型存在的抖动问题; 由实验对比结果可知, 该模型最高控制效率可达到 91%, 具有较好控制效果。

**关键词:** 惯性传感器; 可穿戴; 人机交互设备; 控制模型; 抖动

## Information Control Model of Wearable Human—Machine Interaction Equipment Based on Inertial Sensors

Cheng Xiaofang

(Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China)

**Abstract:** For the information control of wearable man—machine interactive equipment, the traditional control model is easy to be affected by behavior jitter, which leads to low control efficiency. In order to solve this problem, a control model based on inertial sensor is proposed. The deformation of the inner sensitive element of the inertial sensor under the external force is analyzed by measuring the deformation quantity, which is used as the human—computer interaction space to deal with the surface behavior and the mixed behavior in this space. And design the process of continuous interactive space layered processing. According to the results of hierarchical processing, the specific sensing stages and control steps are studied. By analyzing the time of different stages, equipment information of wearable man—machine interaction based on inertial sensors can be effectively controlled. After anti—shake treatment, the jitter problem of traditional model can be improved. The experimental results show that the maximum control efficiency of the model can reach 91%, and the model has better control effect.

**Keywords:** inertial sensors; wearable; human—machine interaction equipment; control model; jitter

### 0 引言

20 世纪末, 随着网络技术和传感器技术快速发展, 部分可穿戴式设备已经从概念化进入商用化<sup>[1]</sup>。2010 年智能可穿戴相关产品开始逐渐成为产业和学术热点, 2012 年由于谷歌眼镜的研发, 智能可穿戴设备成为了下一个热点智能终端产业, 并广泛得到市场各界人士认同<sup>[2]</sup>。随着整个产业逐步成熟发展, 智能可穿戴设备不断推陈出新, 产品形式更加丰富多样。伴随着生活节奏加快和我国逐渐进入老龄化社会, 现代人更加注重身体健康, 可穿戴设备能对人体进行长期控制, 可为医院治疗提供数据支持, 用户对此类智能穿戴设备认知度大幅提高, 其需求受到积极影响, 而且移动互联网技术快速发展, 使大数据得以应用, 为可穿戴人机交互设备信息控制提供了必要条件<sup>[3]</sup>。

传感应用可穿戴人机交互设备日趋成熟, 随着传感器

高效化、智能集成化、可视化和多功能发展, 采用传统二维表面信息控制模型受到触控交互局限性, 导致控制效果较差, 因此, 以惯性传感器为主, 设计了可穿戴人机交互设备信息控制模型。

### 1 惯性传感器可穿戴人机交互空间

惯性传感器通过作用力引起传感器内部敏感元件发生变形, 通过测量变形量, 并利用相关电路转化成电压输出, 得到相应的加速度信号, 进而了解运动物体的运动状态<sup>[4]</sup>。带上可穿戴人机交互设备在行走或跑步时, 设备随之移动, 惯性传感器能记录移动频率, 根据步频可估算出人的速度、一段时间内的前进距离和消耗热量, 从而达到人体步数、行走距离和消耗的卡路里等运动量和睡眠时间、睡眠周期等睡眠质量的监控。通过监测心率来追踪运动强度, 不同的运动训练模式等, 并可以据其推算睡眠周期等关联健康行动数据。通常惯性传感器分为二轴、三轴、六轴、九轴, 其中二轴惯性传感器采用游丝摆锤式机械式的, 能够同时检测两个方向 ( $x$ ,  $y$ ) 上的加速度, 相对来说不够准确; 三轴惯性传感器采用电子式的, 能够同时检测设备在三个

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2018-12-16。

作者简介: 程晓芳(1983-), 女, 研究生, 讲师, 主要从事智能电子设备方向的研究。

方向( $x, y, z$ )上的加速度,能更精准地检测出用户的运动状态;六轴惯性传感器可实时输出陀螺仪和加速计读取到的数据;九轴惯性传感器,是一种组合惯性传感器,可提升可穿戴装置性能<sup>[5]</sup>。

在理想状态下,如果对人体运动追踪足够准确,其运动轨迹是在空间中的连续曲线上,具有时间和空间连续性<sup>[6]</sup>。进入交互空间后,时间是具有连续性的,根据该特点可对任何一个时间点进行轨迹信息记录;而空间连续性可用三维空间一条连续的曲线所描述,不会出现间断。人机交互设备接触与控制动作实际上是整个空间连续性的表达结果,在进行人体工作识别时,应将多段交互行为上的轨迹作为整个空间交互行为中的一部分。充分考虑平面接触前、后整个过程的交互行为,因此,基于时间和空间连续性,将表面触控当作三维交互动作,形成人体在表面与空间内部的行为。在通常情况下,随着惯性传感器设备数量的增加,各个交互通道带宽之和就是交互设备信息带宽总计,受到传输速率影响,惯性传感器数量越来越多,交互能力就越来越弱。为了满足多个点的智能控制,需使用电容交互技术显示在屏幕表面;而离开屏幕表面的节点,需利用自电容感应技术进行控制<sup>[7]</sup>。由于单个设备交互层可包括压力、面积多个信息,具有较高精度,而多个设备交互层包含了交互表面和大部分连续空间,只有不断进行切换,才会保证交互带宽与起始带宽大小一致。多个设备交互层的交互空间包含了表面空间,优于最顶层,具备接近表面层的交互带宽,能够获取更大交互自由度<sup>[8]</sup>。

## 2 基于人机交互空间信息分层处理

传感器是可穿戴设备的核心器件,是人与物沟通的“芯”,是开启“感知时代”的大门,是产品功能差异化的重要硬件。以运动腕带的智能穿戴设备为例,可以实时记录和评估人体活动和健康状况,包括实时记录运动量、消耗的卡路里、监测心率、血压、睡眠质量甚至是紫外线指数,还可以支持蓝牙通话、定位跟踪等功能。

基于人机交互空间信息分层处理,是在连续交互空间内对表面行为和混合行为进行统一处理,具体处理流程如图1所示。

由图1可知:层次模型的构建是在交互空间基础上,分别对应空中动作形态输入、表面动作形态输入、多个设备形态输入<sup>[9]</sup>。人机交互设备可负责获取输入感知和输出反馈信息,通过多个传感器能够感应不同层次人体行为输入的实时空间位置信息,对于同一动作行为输入,需要使用多个惯性传感器来感应,因此,只有多个惯性传感器感知条件下,才可进行数据自由匹配,并对多个惯性传感器下的不同层次空间手势进行数据采集,进而对输入位置点进行转换。

缓存人机交互设备空间位置点信息,在一定条件内设置策略,使其形成输入信息轨迹,并对轨迹进行切分处理。对切分后轨迹进行装配与分类,并识别人体动作行为输入类型,根据行为输入类型的不同,连接分段轨迹,依据人机交

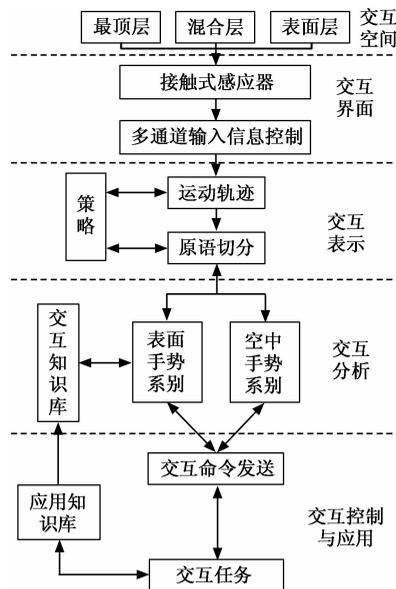


图1 连续交互空间分层处理流程

互应用属性分析轨迹信息,并对其进行表面投影操作,形成交互原语,为人机交互设备信息控制模型建立奠定基础。

## 3 人机交互设备信息控制模型建立

利用可穿戴技术可将多媒体信息与无线通信技术结合起来,并嵌入交互设备之中,对人的手势和眼动操作交互方式进行控制。为了能够更好地理解人机交互过程,根据上述提供的分层处理结果,结合光学心率传感器、皮电反应传感器、血压传感器和生物电阻抗传感器对惯性传感器对可穿戴人机交互设备信息控制模型进行设计。该模型可分为4个具体传感阶段,7个控制步骤,如果控制模型能够正确反映执行者交互行为动作,则说明该模型能够有效对人机交互设备信息进行控制。

1) 具体传感阶段:光学心率传感器可通过监测心率来追踪运动强度,不同的运动训练模式等,并可以据其推算睡眠周期等关联的健康行动数据;由于人类皮肤是一种导体,皮肤电阻随着汗腺机能变化而变化,因此皮电反应传感器工作原理为:人体由于交感神经兴奋,导致汗腺活动加强,分泌汗液增多,因汗内盐成分较多使皮肤导电能力增强。当流汗时,不管是因为运动还是其他原因,皮电反应传感器都可以检测出来。如果在流汗,皮电反应传感器可以收集到更多的数据,更加精准地测出用户在做什么运动,从而更好地进行健身追踪。

血压可衡量人体是否健康,通常血压传感器分为有创测量和无创测量两类,有创测量是直接进行血压测量,利用穿刺技术实现血管内放置导管后的有创测量,例如在做心脏诊断和治疗时,需要监测患者是否能够进行有创血压测量,如果可以,则将外界干扰降到最低,保证测量的有效性;而无创测量是利用空气为介质的一种血压间接测量方式,易收到外界干扰,可穿戴人机交互设备就采用此方法测量。可穿戴人机交互设备的测量血压技术实现了无袖

带、非压迫、实时连续、无需校准测量，实现了血压的随时、随地监测。可穿戴人机交互设备通过内置光学传感器测量血压的原理是在某一时间段对用户的皮肤进行连续信号收集，通过对某一时间段连续图像进行信号处理，得出该时间点皮肤对光的吸收变化。只要测得皮肤对光的吸收变化，可推算出动脉血液的流速变化，再通过流体模型可计算得出血压的变化值；

生物传感器进行心率、出汗率、血压、血氧数据采集存在的普遍问题是测量数据不够准确，主要因为传感器硬件本身和搭载算法的不成熟导致的。在未来的设计中首先要提高感知层设备之间的兼容性和优化软件的算法来确保数据传输过程中的准确性，还要充分利用大数据和云端互联的优势，实现对人体健康指标数据的真实性。

2) 控制步骤：该模型共有 7 个步骤，分别是目标建立、意向形成、指定动作排序、动作执行、感知状态、解释状态和评估状态，其中输入与输出共同构成界面，在交互流程中具有四个步骤，各个步骤都有各自描述语言，模型按照描述语言进行状态分析，通过最后执行阶段完成设备信息控制。

人机交互设备信息控制模型设计如图 2 所示。

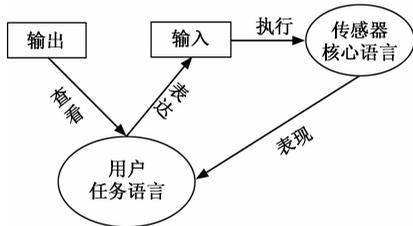


图 2 人机交互设备信息控制模型

在图 2 所示人机交互控制模型中，反映交互能力和执行绩效，方便用户理解交互过程。对用户目标描述，可完成目标交互任务描述；设计按键、移动鼠标操作符，可为用户目标执行提供基本操作能力；选择预测方式来分解子目标，为用户目标状态作出决策。从控制模型中导出具体执行方法，使用短暂估计记忆方式，分析人体状态行为。

该模型是一种低层次物理模型，可将高层次交互行为分解，通过再次映射可形成低层次物理操作行为，方便预测一个低层次交互任务执行阶段所耗费的时间，数据表达式如下所示：

$$T_e = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 \quad (1)$$

公式 (1) 中： $T_1$  表示按键或移动鼠标操作时间、 $T_2$  表示人体状态定位时间； $T_3$  表示复位时间； $T_4$  表示移动动作耗费时间； $T_5$  表示决策时间； $T_6$  表示响应时间。对于用户执行情况，需从人类各种操作行为中提取出来，保证模型输出表征人类操作活动的特征指数，通过分析不同阶段时间，可有效控制基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备信息。

#### 4 防抖处理

根据上述构建的基于惯性传感器的可穿戴人机交互设

备信息控制模型，受到身体抖动影响，导致控制效果较差，因此，需进行相应处理。利用惯性传感数据对身体抖动进行处理，采用自适应肤色分割法进行肤色分割，形成“行为检测→状态跟踪漫游→按键或移动鼠标操作”的人机交互过程。

利用双指数平滑滤波拟合和预测时间序列，其中趋势因数为：

$$\alpha_n = \chi(Q_n - Q_{n-1}) + (1 - \chi)\alpha_{n-1} \quad (2)$$

公式 (2) 中： $\chi$  为比例系数， $\alpha_n$  表示趋势因子，可对当前相邻滤波数值更新； $\alpha_{n-1}$  表示上一刻趋势因子，平滑趋势因数序列； $Q_n$  表示传感器平滑输出值。根据该趋势因子，可获取传感器滤波输出值：

$$Q_n = \beta Q'_n + (1 - \beta)(Q_{n-1} + \alpha_{n-1}) \quad (3)$$

公式 (3) 中： $Q'_n$  表示待测传感器滤波输出值； $\beta$  表示比例系数。通过计算滤波值，可有效消除输出数据滞后现象，并在一定程度上解决抖动问题。

### 5 实验分析

采用 FPGA 平台验证基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备信息控制模型的有效性，并对主要功能进行验证与分析。

#### 5.1 实验参数设置

可穿戴人机交互设备中应用最多的惯性传感器是 LIS3DH 和 MPU6500 两种，智能设备中还用到 ADXL362、BMA250，四种惯性传感器的参数设置如表 1 所示。

表 1 传感器参数设置

类型	LIS3DH	MPU6500	ADXL362
封装形式	LGA-16	QFN-24	LGA-16
封装尺寸	3 * 3 * 1	3 * 3 * 0.9	3 * 3.25 * 1.06
轴数	3	6	3
生产厂商	意法半导体	应美盛	ADI
应用产品	bong2、咕咚手环、Fitbit Flex、NIKE、LG Watch、Misfit Shine	Galaxy Gear、Gear Fit、Microsoft Band	小米手环

根据该参数，对实验结果进行对比分析。

#### 5.2 实验结果与分析

在人机交互设备信息控制过程中，人体运动力学速度如图 3 所示。

由图 3 可知：当时间为 0.1~0.2 s 时，人机交互处于反映阶段，速度在 0~20 mm/s 范围内变化；当时间为 0.2~0.85 s 时，人机交互处于初级阶段，速度在 20~380 mm/s 范围内变化；当时间为 0.85~1.2 s 时，人机交互处于第二阶段，速度在 50~170 mm/s 范围内变化；当时间为 1.2~1.4 s 时，人机交互处于验证阶段，速度在 0~100 mm/s 范围内变化。

根据人体运动力学速度，将传统控制模型与基于惯性传感器信息控制模型的双指数滤波效果进行对比分析，结

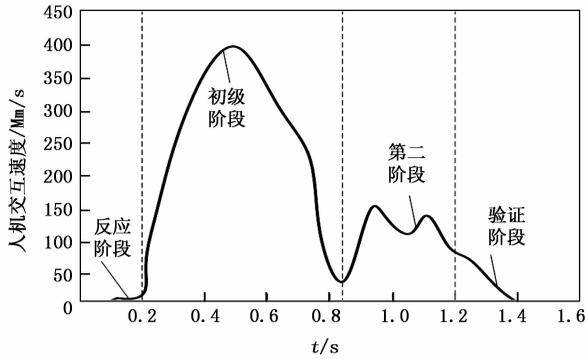


图 3 人体运动力学速度

果如图 4 所示。

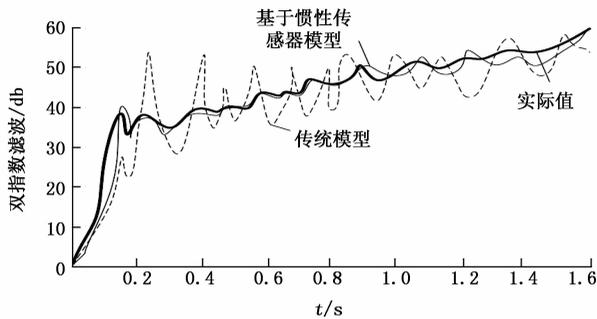


图 4 两种控制模型双指数滤波效果

由图 4 可知：当时间为 0.2 s 时，传统模型双指数滤波为 22 db，基于惯性传感器模型双指数滤波为 35 db，与实际值一致；当时间为 0.6 s 时，传统模型双指数滤波为 36 db，基于惯性传感器模型双指数滤波为 42 db，实际值为 41 db；当时间为 0.8 s 时，传统模型双指数滤波为 38 db，基于惯性传感器模型双指数滤波为 45 db，与实际值一致；当时间为 1.0 s 时，传统模型双指数滤波为 53 db，基于惯性传感器模型双指数滤波为 45 db，实际值为 46 db；当时间为 1.2 s 时，传统模型双指数滤波为 41 db，基于惯性传感器模型双指数滤波为 52 db，实际值为 50 db；当时间为 1.6 s 时，传统模型双指数滤波为 51 db，基于惯性传感器模型双指数滤波为 57 db，与实际值一致。

根据上述控制模型双指数滤波对比效果可知，基于惯性传感器模型双指数滤波与实际值更为接近，说明该模型对设备信息控制能力较强，为了验证该模型具有良好控制效果，将传统模型与该模型进行对比分析，结果如图 5 所示。

如图 5 所示结果可知：传统模型的控制效率呈下降趋势，而基于惯性传感器模型控制效率呈上升趋势。当时间处于人机交互反映阶段时，传统模型控制效率最高为 65%，最低为 40%。基于惯性传感器模型控制效率最高为 82%，最低为 71%；当时间处于人机交互初级阶段时，传统模型控制效率最高为 71%，最低为 25%。基于惯性传感器模型控制效率最高为 86%，最低为 70%；当时间处于人机交互第二阶段时，传统模型控制效率最高为 36%，最低为 25%。基于惯性传感器模型控制效率最高为 88%，最低为 75%；

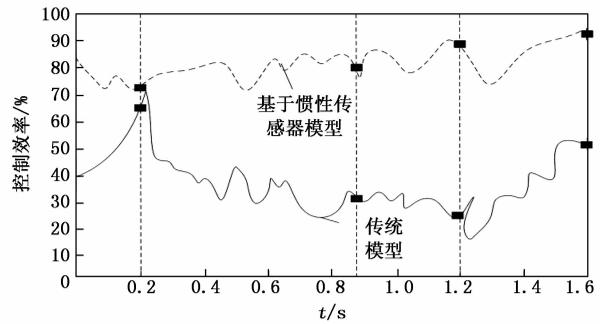


图 5 两种模型控制效果对比分析

当时间处于人机交互验证阶段时，传统模型控制效率最高为 52%，最低为 18%。基于惯性传感器模型控制效率最高为 91%，最低为 72%。因此，基于惯性传感器模型控制效率较高。

### 5.3 实验结论

根据上述实验结果可得出实验结论，如表 2 所示。

表 2 实验结论

时间/s	传统模型	基于惯性传感器模型	差值
0.2	66	72	6
0.4	35	81	46
0.6	39	80	41
0.8	28	82	54
1.0	36	80	44
1.2	29	88	59
1.4	40	85	45
1.6	55	91	36

由表 2 可知，当时间为 0.2 s 时，两种模型对可穿戴人机交互设备信息控制效率相差最小；当时间为 1.2 s 时，两种模型对可穿戴人机交互设备信息控制效率相差最大。由此可知，基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备信息控制模型研究是具有有效性的。

## 6 结束语

通过运动传感器可实时监测运动状态，实时测量人体的脉搏、血压等生理状态，完成健康预警和病情监控功能，采用传统控制模型尚不成熟，这是导致获取数据不够精确主要原因。提出基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备信息控制模型，经过实验对比结果可知，基于惯性传感器的可穿戴人机交互设备信息控制模型研究是具有有效性的，当时间为 0.2 s 时，基于惯性传感器模型对可穿戴人机交互设备信息控制效率最低，为 72%；当时间为 1.6 s 时，基于惯性传感器模型对可穿戴人机交互设备信息控制效率最高，为 91%。因此，该模型具有较高控制效率。只要不断进行传感器技术创新，相信可穿戴设备很有可能称为下一代主流电子终端产品。

### 参考文献：

[1] 蒋小梅, 张俊然, 赵 斌, 等. 可穿戴式设备分类及其相关技

术进展 [J]. 生物医学工程学杂志, 2016, 22 (1): 42 - 48.

[2] 潘溯源. 数字艺术中的人机交互模型结构与交互控制行为设计研讨 [J]. 艺术百家, 2018, 18 (1): 25 - 33.

[3] 李连鹏, 解 仑, 刘振宗, 等. 基于人机交互的重载机械臂控制方法 [J]. 机器人, 2018, 40 (4): 525 - 533.

[4] 王晓峰, 李 醒, 王建辉. 基于无模型自适应的外骨骼式上肢康复机器人主动交互训练控制方法 [J]. 自动化学报, 2016, 42 (12): 1899 - 1914.

[5] 刘 杰, 黄 进, 田 丰, 等. 连续交互空间下的混合手势交互 (上接第 65 页)

由以上可见, 在上述两种控制方法下的 Buck 型降压变换器系统输出电压误差均能快速收敛到平衡点, 而方法一的系统输出电压误差收敛速度明显快于方法二所控制下的系统输出电压误差的收敛速度. 同时, 从图 2~3 可知, 当系统状态变量初始值变化时, 方法一中的输出电压误差收敛时间基本不变, 其收敛时间均在收敛时间估计上界 0.11 s 内. 可见, 方法一控制下的 Buck 型降压变换器系统输出电压误差可在固定时间内从任意初始位置收敛到平衡点的邻域内, 且其收敛时间上界与系统状态变量初始值无关.

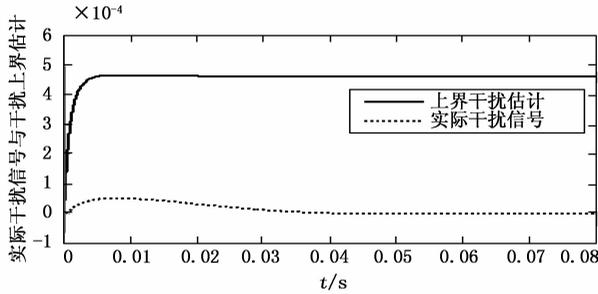


图 4 扰动与补偿

### 4 结论

针对存在参数不确定性的 Buck 型降压变换器系统, 提出一种非奇异固定时间滑模控制方法. 首先构造了非奇异固定时间终端滑模面, 并基于该滑模面设计了固定时间控制器, 实现了系统输出电压误差在固定时间内收敛到平衡点的邻域内, 且其收敛时间上界不再依赖系统状态变量初始值, 而仅与系统控制参数有关. 其次, 设计了自适应更新律在线估计系统不确定干扰上界, 有效抑制了不确定干扰对系统的影响, 提高了控制器性能. 同时, 此控制方法无需干扰上界的先验知识. 通过李雅普诺夫定理证明了系统输出电压误差的固定时间收敛性能. 最后, 仿真结果证明了所提控制方法的有效性.

### 参考文献:

[1] Mahdavi J, Nasiri M R, Agah A, et al. Application of neural networks and State-space averaging to DC/DC PWM converters in sliding-mode operation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10 (1): 60 - 67.

[2] Tan S C, Lai Y M, Cheung M K H, et al. On the practical de-

互模型 [J]. 软件学报, 2017, 28 (8): 2080 - 2095.

[6] 张修乾. 基于人机交互的工业产品设计模型研究 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (20): 153 - 155.

[7] Farzana J, 田琳琳, 任 怡, 等. 针对可穿戴设备的虚拟鼠标 [J]. 智能系统学报, 2017, 12 (2): 133 - 139.

[8] 范 珊. 基于可穿戴技术的远程医疗系统设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (10): 186 - 189.

[9] 吴有龙, 贾方秀, 杨 忠, 等. 惯性传感器随机误差辨识方法研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2016, 18 (2): 4 - 7.

[10] sign of a sliding mode voltage controlled buck converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (2): 425 - 437.

[3] Chen Q, Ren X, Oliver J A. Identifier-based adaptive neural dynamic surface control for uncertain DC-DC buck converter system with input constraint [J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2012, 17 (4): 1871 - 1883.

[4] 李东山, 宋晓娜, 宋 帅. 基于无源性的光伏 DC/DC 变换器的全局滑模控制 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 106 - 109.

[5] 皇甫宜耿, 卓生荣, 王小飞, 等. 一种基于 STD 的 Buck 变换器滑模控制 [J]. 西北工业大学学报, 2016, 34 (4): 663 - 668.

[6] 刘彦呈, 古龙瑞, 张勤进. DC-DC 变换器新型趋近律滑模控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30 (1): 64 - 68.

[7] Komurcugil H. Non-singular terminal sliding-mode control of DC-DC buck converters [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21 (3): 321 - 332.

[8] Wang J, Li S, Yang J, et al. Finite-time disturbance observer based non-singular terminal sliding-mode control for pulse width modulation based DC-DC buck converters with mismatched load disturbances [J]. IET Power Electronics, 2016, 9 (9): 1995 - 2002.

[9] 杨 晨, 程盈盈, 都海波, 等. Buck 型变换器自适应有限时间降压控制算法研究 [J]. 自动化学报, 2016, 42 (2): 315 - 320.

[10] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57 (8): 2106 - 2110.

[11] Zuo Z. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9 (4): 545 - 552.

[12] Chen Q, Xie S, Sun M, et al. Adaptive non-singular fixed-time attitude stabilization of uncertain spacecraft [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54 (6): 2937 - 2950.

[13] Li C, Dong J, Guo Y, et al. Adaptive fixed-time attitude stabilization of a rigid body [C]. Dalian, the 36th Chinese Control Conference, 2017, 3667 - 3672.

[14] Lu K, Xia Y. Finite-time attitude stabilization for rigid spacecraft [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2015, 25 (1): 32 - 51.