



# 行人惯导实时定位实验教学平台设计与应用

覃昊洁, 阎波, 林水生, 周亮

(电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 根据行人定位系统的实时性、便携性和经济性需求, 设计并开发了基于片上系统的行人惯导实时定位实验平台。该平台兼具较强的运算能力和丰富的接口资源, 可在无需依靠任何外部辅助设备的情况下, 实时对不同运动模式的行人进行定位。相较于传统惯导定位平台, 该平台可扩充多个综合型、研究型实验项目, 支撑不同阶段、不同难度的基础或专业课程实验。相较于常用的神经网络相关实验平台, 该平台在成本、功耗、体积等方面都表现更优, 利于大规模推广应用。兼具实时性和便携性的实验平台能为学生提供更直观、深入的实践体验, 与单纯的仿真验证相比, 能更好地激发学生的学习兴趣, 兼顾科研探索能力和工程实现能力的培养。

**关键词:** 惯导定位; 片上系统; 实验平台; 实时定位

中图分类号: TN409

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230500

## Design and Application of the Pedestrian Real-time Inertial Navigation Experiment Teaching Platform

QIN Haojie, YAN Bo, LIN Shuisheng, ZHOU Liang

(School of Information and Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** According to the real-time, portability and economic needs of the pedestrian positioning system, the paper designs and builds an experimental platform about real-time inertial navigation of pedestrian based on the system on chip (SoC). The platform has both rich computing resources and rich interface resources. Without relying on any external auxiliary equipment, the platform displays the position of pedestrians in different sports modes in real time. Compared with the traditional inertial navigation positioning platform, the platform can expand multiple comprehensive and exploratory experiments, and support basic or professional experiments of different stages and different difficulties. Compared with the common experiment platform of neural network, the platform performs better in terms of cost, power consumption, volume, etc. The experiment platform with both real-time and portability can provide intuitive and thorough practical experience for students. Compared with the simulation verification, the new experiment platform help stimulate students' interest in learning, and balance the cultivation between scientific research exploration ability and engineering realization ability.

**Key words:** inertial navigation; system on chip; experimental platform; real time

行人定位作为定位导航技术的重要分支, 在室内导航、残障引导、智慧城市、智能搜救等领域皆有广泛应用<sup>[1-3]</sup>。在实际教学中, 行人定位实验需融合高等数学、传感原理、导航定位等多个学科知识, 涉及算法研究、仿真验证、数据分析、硬件设计及系统调试等多个开发环节, 利于进一步夯实学生的理论基础, 培养解决复杂工程问题的能力。相关实验平台可支撑物联网技术、

综合课程设计等综合性、设计性强的本科高年级课程实验, 同时又能开展微处理器系统与嵌入式系统设计、无线传感器网络等基础课程的“挑战性课程”实验<sup>[4-6]</sup>。

基于惯性导航系统的定位技术无需依靠任何外部辅助设备即可实现行人自主定位, 具有价格便宜、体积小、功耗低、稳定性强、定位准确率高优点, 在高校和业界都得到了深入研究和

收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(61973056); 2020年产学研合作协同育人项目第一批(202002109038)。

作者简介: 覃昊洁(1989-), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事物联网技术、定位导航、嵌入式系统方面的研究。

E-mail: qin haojie@uestc.edu.cn

广泛应用<sup>[7]</sup>。基于卡尔曼滤波的零速更新算法通过在零速更新点修正误差, 解决了惯性导航系统长时间的误差累积问题, 提高定位准确率<sup>[8]</sup>。传统惯导定位实验基于微控制器设计实验平台(如STM32)<sup>[9]</sup>, 通过固定阈值判定零速更新点。实验设备可用于手持实时定位, 兼具成本、功耗、性能和体积优势。实验效果直观且实用性强, 能很好地激发学生的学习兴趣和探索精神。然而该实验仅在常速走时保持较好的定位效果, 在快走、跑步等模式下无法通过固定阈值得到准确的零速更新点, 从而无法及时修正误差<sup>[10]</sup>。基于自适应阈值的零速更新算法可通过人工智能准确识别不同运动模式下的零速更新点, 从而弥补传统算法在鲁棒性方面的缺陷, 但目前神经网络相关实验平台大多基于带GPU的服务器<sup>[11-12]</sup>, 价格昂贵、功耗高且体积庞大, 不符合行人定位的实时性和低功耗需求。相关实验停留在理论模型描述及仿真, 很难让学生深刻地理解、认知该技术。

本文利用片上系统(system on chip, SoC)为行人惯导定位的相关实践设计配套的实验平台, 可同时支持传统零速更新算法和基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的零速更新算法, 为实验教学提供实时的数据采集、传输、处理和显示平台。在此基础上, 进一步追求成本、功耗、性能和体积的平衡, 为平台的大规模推广

应用打下良好的基础。此外, 该方案也可可为其他对实时性、便携性和功耗要求较高的实验平台设计提供参考。

## 1 实验平台设计

基于微控制器的传统惯导定位实验平台能够很好地完成惯导系统数据采集、网络传输和显示任务, 但无法支撑CNN法庞大的运算量, 因此无法保证惯导数据的实时处理。现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA), 其并行性和灵活性便于该类复杂算法的实现。尤其对于重复执行的数据处理操作, 可通过并行化处理和多级流水线进一步提高运算效率。但FPGA在数据采集、组网传输这类控制任务方面不具备优势, 实现相关驱动和应用工作量大且很难保证可靠性。兼具可编程逻辑(programmable logic, PL)和处理系统(processing system, PS)的SoC既具备丰富的运算资源, 又有强大的控制能力, 并且价格、功耗和体积都远低于CPU或GPU平台, 能很好地支撑该类实验平台的设计和实现。

### 1.1 实验平台架构

实验平台由带显示屏的SoC实验板、无线网卡和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)组成, 实验平台以模块化结构进行设计, 便于兼顾传统实验和CNN法, 提升学生实践设计的效率。具体结构如图1所示。

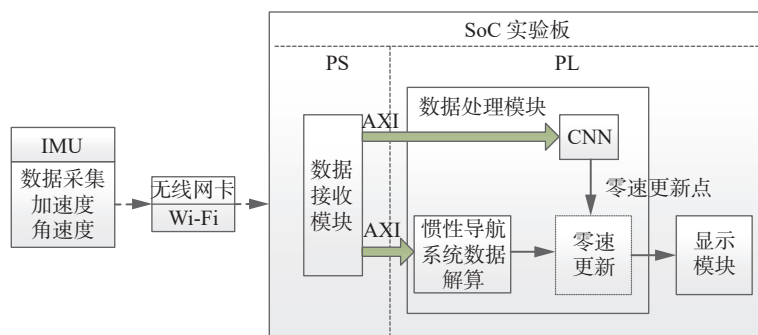


图1 实时行人惯导定位实验平台结构图

IMU以400 Hz的频率采集三轴加速度和角速度数据。无线网卡用于数据传输, 通过Wi-Fi将IMU采集的信号传输到SoC实验板的PS。PS负责数据接收, 并将收到的数据通过高级扩展接口(advanced extensible interface, AXI)总线分别传到PL的CNN模块和惯导系统数据解算模块。PL负责数据处理和显示, 内部的惯性

导航系统数据解算模块用于将角速度和加速度换算为行人的位置、姿态和速度信息, 便于定位和轨迹的绘制。CNN模块用于分辨当前采样点是否零速更新点, 若是启用零速更新算法修正误差, 并将修正后的位置、姿态和速度传输到显示模块绘制轨迹; 否则直接传输原数据。此外, CNN模块可替换为后续任何改进的零速

更新算法，为后续实验内容的更新预留空间。

### 1.2 数据接收模块设计

数据接收模块的核心任务是与数据采集模块建立连接并且将收到的数据包解析为加速度和角速度数据，如图 2 所示。

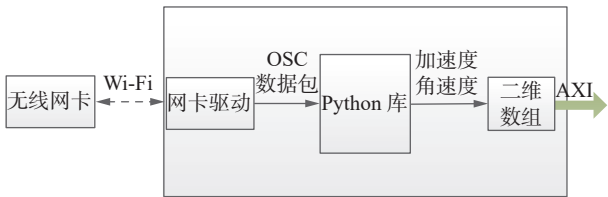


图 2 数据接收模块结构图

业内常用的 IMU 通常将数据以开放源代码格式(open source commerce, OSC)数据包的形式通过 Wi-Fi 传输<sup>[13]</sup>。SoC 实验板的 PS 能够直接调用底层的网卡驱动，通过无线网卡的 Wi-Fi 接收数据包。Python 库有很多成熟的算法用于解析 OSC 数据包，而 PS 可支持相关的 Python 库。PS 需要将解析好的大量数据快速传给 PL 处理，因此对传输速率和传输带宽要求很高。SoC 平台的内部高速 AXI 总线能较好地解决该问题。最终，数据接收模块将接收到并解析好的加速度、角速度二维数组通过 AXI 传输到 PL。

### 1.3 数据处理模块设计

数据处理模块主要在 PL 中以模块化的形式进行设计，按照功能将其划分为惯性导航系统数据解算子模块、零速更新子模块和 CNN 子模块，其中涉及大量的矩阵运算(乘法、加法、求逆)和卷积运算。利用 PL 的并行性，并且在各级运算之间插入流水线，能够极大地缩短运算时间，满足定位的实时性需求。

惯性导航系统数据解算子模块先对接收到的三轴加速度和三轴角速度进行低通滤波处理，然

后将滤波后的加速度和角速度换算为姿态矩阵，用于将载体坐标系下的数据转换为导航坐标系。通过导航坐标系下的加速度可以得到当前采样点的速度和位置，具体流程如图 3 所示。

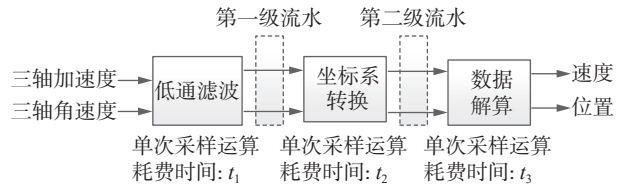


图 3 惯性导航系统数据解算子模块结构图

模块中涉及大量 3×3 矩阵乘法，如果应用微处理器平台每次矩阵乘法至少需要 27 次乘法和 18 次加法才能运算结束，每次乘法或加法运算又涉及取指令、分析指令、执行指令等操作，需多个时钟周期才能完成。应用可编程逻辑实现的并行运算可以实现 3 组运算同时进行，只需 9 次乘法和 6 次加法的时间即可完成 3×3 矩阵乘法运算，每次乘法或加法运算只需一个时钟周期，因此效率至少可提升 9 倍，每组运算间插入流水线可进一步节省 4 次加法运算的时间。此外，如图中虚线框所示，在每级运算中间插上流水线，每个采样点的一次数据解算总时间可由原来的  $t_1+t_2+t_3$  缩短为  $t_2$ 。

零速更新子模块主要基于扩展卡尔曼滤波算法<sup>[14]</sup>，算法中同样涉及大量矩阵运算，尤其是矩阵求逆运算会消耗大量时间，参照数据解算子模块的设计，利用 PL 的并行性节省矩阵运算时间。同时在每级运算间插入流水线设计，能进一步缩短该模块的运算耗时。

为了减少对硬件资源的消耗，经过反复训练和验证，设计了一款轻量化的 CNN 模型，如图 4 所示。

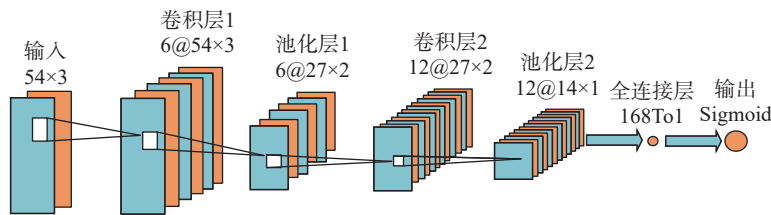


图 4 实验搭建的 CNN 模型示意图

输入层由连续的 54 个采样点组成，每个点分别包含三轴加速度和三轴角速度，因此输入层为两个 54×3 的矩阵。CNN 中耗费运算资源最多的

是卷积层。网络中的卷积核大小最终设置为 3×3，每次卷积对应 9 次乘法运算，每个卷积核对应 54×3×9 次乘法运算。卷积层 1 共有 6 个卷积核，

理论上共需要  $54 \times 3 \times 9 \times 6$  次乘法运算。将单个卷积的乘法运算进行并行化处理, 并且卷积运算的乘法运算流水线处理, 可以将卷积层 1 的运算时间缩短近似  $54 \times 3 \times 6$  个时钟周期。同理, 卷积层 2 可缩短为近似  $12 \times 27$  个时钟周期。全连接层根据权重优化组合池化层 2 中 12 个  $14 \times 1$  矩阵, 其中矩阵乘法运算同样采用并行化处理缩短运算时间。

#### 1.4 显示模块设计

实验平台通过 Verilog HDL 在 PL 端驱动高清多媒体接口 (high definition multimedia interface, HDMI) 绘制实时轨迹。将屏幕中心点设置为运动起始点, 每个像素点代表 0.1 m 的距离。显示模块负责将数据处理模块输出的位置量化为屏幕上的像素点坐标。存储进位宽为 1 bit, 深度为  $640 \times 480$  的随机存取存储器 (random access memory, RAM) 中。驱动采用行扫描的形式依照 HDMI 时序, 读取 RAM 中像素数据, 向屏幕发送待显示信息。

## 2 实验项目设计

实验项目的设计充分利用本平台“灵活性、运算速度快、体积功耗小”的特点, 既覆盖传统惯导定位实验, 又支持基于 CNN 的研究型实验。针对不同年级、不同基础的学生, 本平台可支撑一整套循序渐进、从易到难、环环相扣的实验项目, 具体如表 1 所示。

基础实验包含 SoC 平台的搭建、数据的采集和预处理, 着重于基础嵌入式开发技能以及高等数学在惯性导航中的基础应用, 适用于本科低年级课程或大型项目式实践训练的初级阶段。综合实验包含零速更新算法、参数的选取、算法的硬件实现和系统调试等技能的训练, 着重于传统惯导定位算法在该平台的实现和应用, 适用于本科高年级的课程或大型项目式实践训练的中级阶段, 用于学生的基础科研素养培训。研究型实验包含零速更新算法的改进、卷积神经网络的训练、验证、实现及系统调试, 着重于人工智能在惯导定位中的具体应用, 适用于本科高年级课程或大型项目式实践训练的高级阶段, 用于高年级学生的科研综合能力培养。各课程组可结合教学实际需求和学生的专业背景、能力水平等灵活选择实验项目。相较于传统平台, 本平台不仅能够扩充基于 CNN 的研究型实验, 还可扩充其他改进的零速更新算法实验。扩充的实验项目进一步丰

富了惯导定位实验的实验内容和实验形式, 为“小班研讨式教学”“挑战性课程”“项目式教学”等教学改革提供优质素材<sup>[15]</sup>。

表 1 平台可支撑的实验项目

实验类型	实验项目	实验形式
基础实验	IMU数据采集	软件设计+调试
	传输网络搭建	软件设计+调试
	数据包解析	软硬件设计+调试
	AXI总线传输	软硬件设计+调试
	惯导数据解算及定位显示	软硬件设计+调试
综合实验	系统调试及误差分析	系统测试+仿真分析
	零速更新算法	理论授课+小组研讨
	固定阈值拟定	数据采集+仿真分析
	零速更新模块设计及实现	软硬件设计+仿真验证
	惯导数据解算及定位显示	软硬件设计+调试
研究型实验	系统调试及误差分析	系统测试+仿真分析
	基于CNN的零速更新算法	理论授课+小组研讨
	CNN的训练	数据采集+仿真分析
	CNN的验证	数据采集+仿真分析
	CNN模块设计及实现	软硬件设计+仿真验证
	系统调试及误差分析	系统测试+仿真分析

## 3 实验平台实现

根据上述实验平台设计方案, 数据采集模块选用 Ignitec 的 IMU, 该模块是一个紧凑的惯导数据采集平台, 结合了板载传感器、数据处理算法和通信接口, 能为实验提供高速、稳定的数据采集。考虑到学校微处理器系统与嵌入式系统设计课程实验已应用 SoC 实验板 EES331, 学生对相关设备有一定基础, 因此直接选用该设备作为本平台的 SoC 实验板, 但其他 SoC 实验板只要评估资源足够, 同样可用于实现本文设计的实验平台。实验平台如图 5 所示。



(a) IMU 实物图

(b) EES331 实验板

图 5 基于 SoC 的实时行人惯导定位实验平台

实际应用时将 IMU 固定于脚上, 如图 5(a)所示, 手持 SoC 实验板用于定位轨迹的实时绘制, 如图 5(b)所示。SoC 实验板的资源占用情况如表 2 所示。利用率分别为: 数字信号处理(DSP) 61.4%, 块 RAM 23.6%, 触发器(FF)28.4%, 查找表(LUTs)62.3%。

表 2 逻辑资源占用统计表

模块	数字信号处理 (DSP)	块 RAM	触发器 (FF)	查找表 (LUTs)
数据解算子模块	60	5.5	9856	9962
零速更新子模块	20	2	5758	5562
CNN 子模块	40	16.5	7842	11303
显示模块	15	9	6721	6319

数据处理模块需要大量乘法和加法运算, 因此占用了较多的 DSP、FF 和 LUTs, 绘图模块由于需要驱动 HDMI, 因此较多的 RAM 资源被该模块占用。总体看来 EES331 的资源利用率小于 60%, 完全满足实验平台要求, 并且还有一定的空闲资源用于支撑其他算法的扩充。

#### 4 实验平台的应用

灵活性强、运算速度快、体积功耗小的实验教学平台为阶段化、阶梯式的实践项目提供基础和条件。课程组结合学生兴趣与培养方案, 应用该平台在物联网工程专业本科四年级上学期的综合课程设计实践课程中开展相应的实验实践训练。学生应用实验平台进行惯导行人定位的实拍图如图 6 所示。

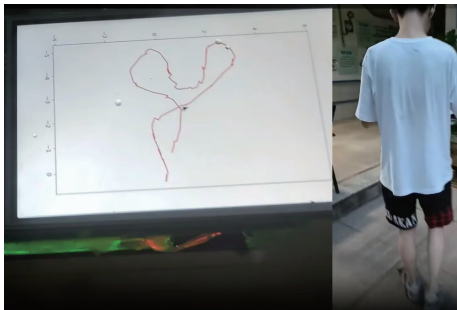


图 6 学生实验实拍图

得益于实验教学平台的开发, 学生在实验中体验了仿真分析和实际测试之间的差别。所有学生都遇到了实时定位表现不符合软件仿真波形的问题, 但原因却各不相同, 如传感器校准问题、

参数设置问题、行走路径和方向问题等。

为了全面比较和分析实验教学平台在性能和功耗上的优势, 学生在通用计算机、基于 GPU 的服务器和本实验平台上分别测试基于 CNN 的惯导定位算法, 分析对比成本、功耗、便携性和性能, 如表 3 所示。

表 3 几种平台的对比表

指标点	通用计算机 (i7-6700)	GPU平台 (1050Ti)	SoC (EES331)
成本/元	7000	9500	3000
功率/W	69	425	3.1
单点运算能耗PE/J	51.8	17.5	553.4
重量/g	6960	18000	386
单点运算时间/ $\mu$ s	279.6	134.3	582.9

通用计算机和 GPU 平台的功率参照官网电源性能参数, SoC 的功率参照开发平台 Vivado 对该工程的分析总结数据。单点运算能耗为:

$$PE = \frac{n}{pt} \quad (1)$$

式中:  $n$  为时间  $t$  (单位 s) 内运算完成的惯导数据采样点数量;  $p$  为功率, 单位 W。根据分析, SoC 平台的单点运算时间确实比通用计算机和 GPU 平台高, 但成本、功率和重量都远低于通用计算机和 GPU 平台。通过 PE 综合评定能量效率, SoC 平台是通用计算机的 10.6 倍, 是 GPU 平台的 31.6 倍。成本方面 EES331 仅为通用计算机的 40%, GPU 平台的 31%, 如果选用资源更加紧凑的 PYNQ-Z2, 成本可进一步降为通用计算机的 25%, GPU 平台的 18%。

#### 5 结束语

行人惯性导航实时定位实验平台在保证成本、功耗、便携性和性能的基础上, 可扩展性极强, 能够覆盖基础、综合、研究等不同类型的多个实验项目, 支撑不同阶段、不同难度的基础或专业课程实验, 并且为其他需要庞大运算量的便携式实验项目提供平台设计参考。实时且便携的实验平台有利于学生更直观、深入的理解和认识惯导定位技术, 进一步提高学生的工程实践能力、交叉复合能力、跨界融合能力和创新驱动能力。

#### 参考文献

- [1] 唐科萍, 许方恒, 沈才樾. 基于位置服务的研究综

- 述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4432-4436.
- [2] 卞国龙, 黄海松, 王安忆. 无线传感器网络定位技术的研究[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(6): 122-127.
- [3] 张开生, 王静. 基于ZigBee和RFID的消防员定位系统设计[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(7): 122-126.
- [4] 兰勇, 马力, 冯晓. 多房间、高精度的室内机器人SLMN导航算法[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(6): 33-37.
- [5] 元林, 刘宇, 苟志平. 一种多传感器融合的行人多模式自主定位方法[J]. 压电与声光, 2020, 42(3): 568-572.
- [6] 罗耀耀, 钟山, 王锐. 基于多传感器融合的机器人位姿估计研究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 58-62.
- [7] 杨亮, 李文生, 傅瑜. 基于ROS的机器人即时定位及地图构建[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(8): 99-103.
- [8] XIAO Z, WEN H, MARKHAM A, et al. Robust pedestrian dead reckoning(r-pdr) for arbitrary mobile device placement[C]//In Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Buan: IEEE, 2014: 187-196.
- [9] XIAO Z, WEN H, MARKHAM A, et al. Robust indoor positioning with lifelong learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11): 2287-2301.
- [10] 覃昊洁, 阎波, 林水生, 等. 基于神经网络的步行者室内惯导定位技术[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(5): 48-52.
- [11] 杨瑶, 陈晓. 基于神经网络的说话人识别实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(9): 38-50.
- [12] 虞昉, 黄文焘. 神经网络组合在电能质量智能控制器中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(6): 42-46.
- [13] 徐狄涛, 姜斌, 包建荣. 改进的惯性运动传感器步态识别[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(3): 25-29.
- [14] 高钟毓, 王进, 董景新. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. 中国惯性技术学报, 1995, 3(2): 24-29.
- [15] 陈娟, 杨倩, 文泉. 面向“挑战性课程”的多目标跟踪实验设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(1): 155-158.

编辑 钟晓

(上接第 132 页)

## 参考文献

- [1] 祝蕾, 朱坤福. 医学影像学的发展趋势探究[J]. 影像研究与医学应用, 2018, 2(2): 84-85.
- [2] 黄钢. 核医学与分子影像[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [3] 姜海松. 近距离粒子植入治疗计划系统剂量规划技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [4] 徐聪聪. 稀疏角度锥束 CT 重建算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [5] 李月卿. 医学影像成像原理[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002.
- [6] 夏彬珂, 李天昊, 邓明兴, 等. CT 系统的参数标定及成像方法研究[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(6): 7-12.
- [7] 于巍, 张煜. 当代 PET 显像技术的特点、优点及其应用[J]. 医疗卫生装备, 2001, 22(6): 31-32.
- [8] 谭天秩. 临床核医学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013.
- [9] 刘春旺. PET 工作过程及工作原理分析[J]. 中国医疗设备, 2008, 23(11): 4-4.
- [10] 田翠.  $^{18}\text{F}$ -FDG PET/CT 双时相显像对胰腺良恶性病变鉴别的诊断价值[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [11] 杨敏, 党瑞荣, 刘彤, 等. 放射性探测器发展分析以及应用介绍[J]. 石油仪器, 2009, 23(5): 44-45.
- [12] 黄强. 载 $^6\text{Li}$ 塑料闪烁体能量响应模拟计算及特性参数实验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013.
- [13] 陈艳华. PET 三维数据随机符合校正方法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- [14] 陈盛祖. PET/CT 技术原理及肿瘤学应用[M]. 北京: 人民军医出版社, 2007.
- [15] 颜建华. 正电子发射断层图像重建算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [16] 王国平, 刘迎宾, 李景峰, 等. 虚拟现实技术在人工器官课程教学中的应用[J]. 实验室科学, 2022, 25(5): 74-77.
- [17] 王国平, 叶韶华, 刘迎宾, 等. 磁共振成像虚拟仿真实验平台建设[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(3): 131-135.

编辑 钟晓