

# 基于生命体征监测与室内定位技术的消防员协助系统

王圣哲, 王博, 高鸣远, 罗亮

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 现代科技发展带来高层建筑和复杂建筑结构增多, 导致消防员很容易在火场内受到生命危险。针对消防人员进入复杂火场后的生命体征状态及室内定位问题, 提出了一套完整的协助系统。提出使用 LSTM 神经网络预测消防人员的动作姿态, 使用光电传感器监测消防员的心率血氧以及周边气体环境。同时, 提出了一种基于超宽带通信定位与高精度惯性元件导航进行数据融合的室内消防员定位手段。最后, 终端通过 LoRa-170M 无线系统上传给移动监测平台, 利用 LabVIEW 软件完成了监测上位机, 并通过实验验证了其可靠性及稳定程度。

**关键词:** 消防救援; 生命体征监测; 室内定位; LSTM 神经网络; 超宽带技术

中图分类号: TN98; TH7

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200231

中文引用格式: 王圣哲, 王博, 高鸣远, 等. 基于生命体征监测与室内定位技术的消防员协助系统[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 72-77.

英文引用格式: Wang Shengzhe, Wang Bo, Gao Mingyuan, et al. Aid system for firefighter based on vital signal detection and indoor location system[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 72-77.

## Aid system for firefighter based on vital signal detection and indoor location system

Wang Shengzhe, Wang Bo, Gao Mingyuan, Luo Liang

(School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

**Abstract:** Since the development of modern technology, the number of high buildings and complex structures keeps ascending, which leads to the vital hazard of firefighters. This paper proposes a complete aid system to deal with the issues on vital signal detection and indoor location for the firefighters. In this paper, LSTM Neural Network is employed to classify the attitude and movement of the firefighter, and particular photoelectric sensors are used to detect the heart rate, blood oxygen saturation and the gas surrounded. At the meantime, this paper proposes an indoor location system based on the data fusion of the Ultra-WideBand location and the inertial navigation. Finally data above are transmitted via LoRa-170M Network to the monitoring platform which is built up with the help of LabVIEW. At the end, experiments are designed to verify the ability and stability of the system.

**Key words:** firefighting rescue; vital signal detection; indoor location system; LSTM neural network; Ultra-WideBand technology

### 0 引言

据不完全统计, 2006 年~2016 年, 消防员灭火救援中发生伤亡事故 90 余起, 造成消防员伤亡 300 余人, 备受社会大众重视。从原因来看, 我国消防人员在火场中主要死亡原因为建筑坍塌、中毒、爆炸及触电, 平均死亡时间为十分钟<sup>[1-2]</sup>。这几种伤亡情况如在短时间内得到及时救援都可以使消防员存活率大大上升。

2014 年, 杨树峰等人设计并开发了一套消防人员生命体征监测系统, 该系统能监测运动状态下消防员心率、呼吸率、体温、姿态的变化<sup>[3]</sup>, 但这套系统没有对定位系统进行设计, 对于火场内失联的消防员起不到关键作用。同年, 王庆辉、金焯等人使用 433 MHz 无线通信技术将消防员的实时姿态信息传给数据收集及传输平台<sup>[4]</sup>, 但是该系统测量的消防员体征数据不够丰富。2016 年,

刘晓军等人设计了一种消防员状态实时监测系统<sup>[5]</sup>。纵观之前的设计, 它们都缺少对消防员的定位机制, 并且只能返回体征数据, 而不能根据原始的体征数据进行数据处理和危机状态判断。

本文提出一种基于 LSTM 神经网络的危机状态判断方法, 并且提出了一种针对室内环境的融合定位方式。

### 1 体征信息采集系统设计

#### 1.1 LSTM 神经网络身体姿态判断

在上位机的判断状态的模型中, 本文创新性地使用了深度学习中的 LSTM (长短时记忆神经网络) 来实现姿态判断和数据融合。由于姿态是判断消防员身体状况的一个重要因素, 而姿态判断中六轴加速度传感器实时变化又与时间序列挂钩, 故选择采取以 LSTM 这种以时间序列为特征的神经网络用以训练模型, 并进行消防员姿

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

态的判断<sup>[6-7]</sup>。

## 1.1.1 LSTM 原理

LSTM 神经网络为 RNN 神经网络的变体,通过引入了输入门输出门和遗忘门,解决了 RNN 神经网络的梯度爆炸和梯度消失问题。而相比起传统的设置阈值算法,LSTM 算法可以更智能地提取特征,显著增高判断的准确性,其神经网络单元结构图如图 1 所示。

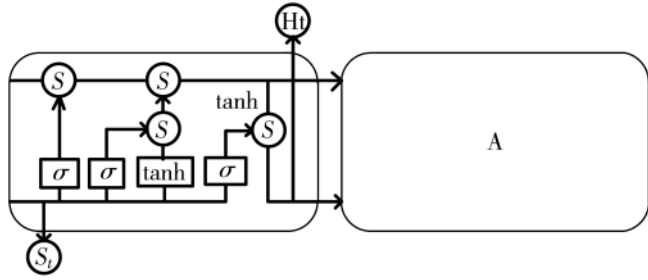


图 1 LSTM 神经网络单元结构图

图 1 中, $S_t$  为第  $t$  层的输入量, $\sigma$  与  $\tanh$  分别表示计算输入量的 Sigmoid 激活函数与  $\tanh$  激活函数, $H_t$  为第  $t$  层的输出, $A$  表示下一层 LSTM 网络。

LSTM 神经网络由于网络结构更深,有着更好的非线性泛化能力,且对于时序信号有着非常好的拟合能力,非常适合用于复杂环境下的消防人员姿态监测。

## 1.1.2 LSTM 数据集来源及网络结构参数

数据来源于 UCI (University of California Irvine) 大学的人类活动和姿势识别数据集,该数据集采集了 30 名 19~48 岁的志愿者的活动数据。

图 2 为数据集中部分数据片段,其中  $\omega$  为陀螺仪 3 个轴的角速度, $t$  为时间序列。

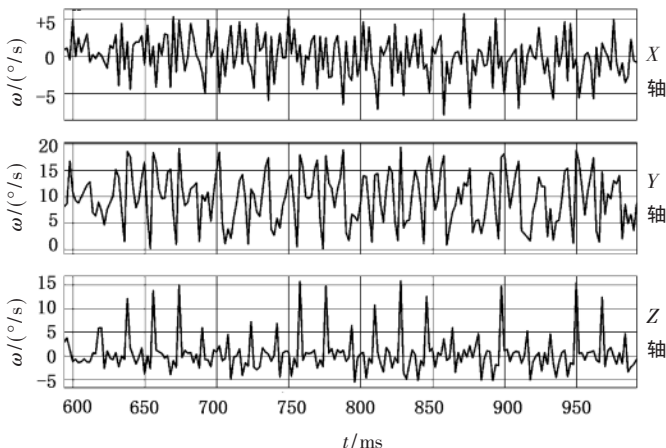


图 2 数据集中展示的行走动作三轴频率曲线

在对信号预处理以去除噪声并进行采样后,将数据集分为两部分,分别为惯性传感器数据与参与者一起进行所有试验的加速度计和陀螺仪产生的原始三轴信号和所有已执行活动的标签,共 10 929 组数据实例,网络结构见表 1。

表 1 LSTM 神经网络结构参数

参数	值
隐藏层数	2
最大迭代次数	1 300
Batch Size	30
L2 正则化系数	0.001 5
损失函数	Softmax
梯度下降方式	Adam
学习率	0.000 6
放弃系数	0.3

实验中负责姿态信息采集的设备主要是集成在腰带上,在进行验证时,采取划分 3:2 的训练集测试集比例,在实际测试时也得到了良好的表现。

## 1.2 消防员心率血氧传感器及其数据处理

对于待测人员进行心率血氧的测量,主要选取以光电容积法为基本原理的脉搏血氧传感器。

使用的传感器由光源和光电传感器构成,通过绑带固定在手指数处进行数据采集。

光电容积脉搏波描记法 (Photoplethysmography, PPG) 是一种借助光电技术在活生命体组织中检测血液容积变化的无创检测方法。光电传感器的电信号变化周期  $T_e$  可以转化为心率值  $p$ ,用公式表示即为:

$$p = \frac{60}{T_e} \quad (1)$$

对于心率的获取,描记血管容积即可,对于信噪比、幅值、波峰波谷 3 个角度分析结果,绿光作为入射光时采集到的 PPG 信号信噪比最大对 PPG 信号强弱变化更为敏感且采集到的信号强度最大。因此,采用 570 nm 的波长绿光作为光源来采集心率信息更为可靠<sup>[8]</sup>。

对于血氧的采集,反射系数、渗透系数与光波长的曲线图显示,对比反射系数和渗透深度,其中绿光反射系数小,渗透深度浅;而红光反射系数大,渗透深度深。使用红光将得到较多的信息,较适合测量血氧<sup>[9]</sup>。

实际当中可以左右手分别佩戴带有不同光源的传感器来实现对心率和血氧较为可靠的采集。

## 2 基于惯性导航与 UWB 定位的多元定位系统

由于传统的 GPS 定位信号遇到障碍物会迅速衰减,无法在楼房中使用,本文提供了一个可应用于室内场景的定位解决方案。

### 2.1 UWB 测距与定位算法

本文在通信定位方面采用了目前比较先进的超宽带 (Ultra Wide Band, UWB) 技术<sup>[10]</sup>。

#### 2.1.1 UWB 技术特性与硬件配置

UWB 技术是一种不需要载波,仅依靠纳秒至微秒级的非正弦波窄脉冲传输数据的通信手段,因而具有能量高度集中、衍射性低、穿透性较强、抗干扰能力较强的特点,在 40 dB 左右的增益下,基本不受到普通建筑墙体

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

的影响。

本文在硬件上采用德州仪器的 DWM1000 射频芯片,配合自主设计的高精度、高增益外围 PCB 射频电路,输出通信信号到 ARM 单片机,基站设计流程如图 3 所示。

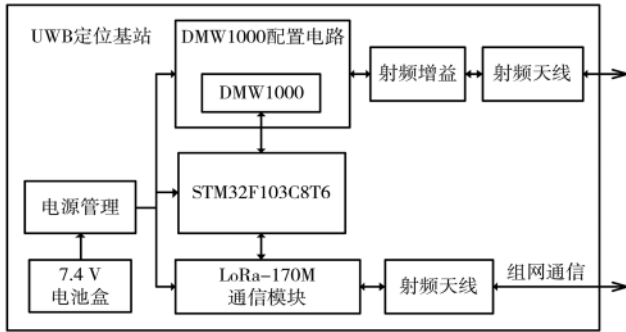


图 3 UWB 定位基站工作流程图

## 2.1.2 双边双向测距算法

本文根据 DWM1000 射频芯片之间的通信,通过双侧双向测距(Double-sided Two-way Ranging, DS-TWR)算法计算出电磁波在空间中传播的距离<sup>[11]</sup>。DS-TWR 测距的具体测量过程如图 4 所示。

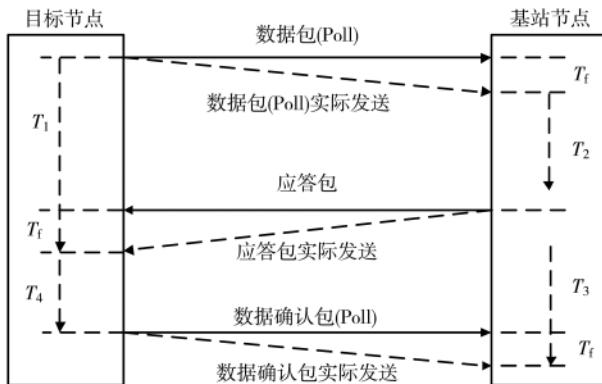


图 4 UWB 定位基站工作流程图

目标节点发送一个测距数据包到基站节点,基站节点过  $T_2$  时间后,回复给目标节点一个应答包,目标节点记录下从发送测距数据包到接收到应答包的时间,记录该时间为  $T_1$ ,等待  $T_4$  时间后,发送一个测距确认包给基站,基站记录从发送应答包到接收确认包之间的时间。

$$\begin{cases} T_1 = T_2 + 2T_f \\ T_3 = T_4 + 2T_f \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $T_f$  为信号在节点间的传播时间。经过简单推导可以获得用  $T_1 \sim T_4$  表示的  $T_f$ , 即:

$$T_f = \frac{T_1 T_3 - T_2 T_4}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \quad (3)$$

由于 UWB 的电磁波段在空气中可以近似为光速  $c$ , 则有两节点间的测量距离为:

$$d = T_f \times c \quad (4)$$

## 2.1.3 UWB 组网定位

通过 4 个带有射频模块的基站构建一个三维空间。将定位用的射频标签放入消防员的头盔中,通过四点距离解算出当前的三维位置信息,如图 5 所示。

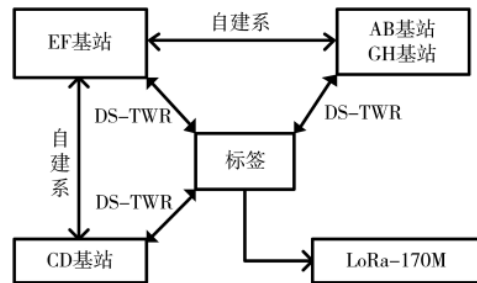


图 5 定位系统结构图

假设基站 AB、CD、EF、GH 的坐标分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$ , 则根据空间几何关系:

$$\begin{bmatrix} 2(x_1 - x_2) & 2(y_1 - y_2) & 2(z_1 - z_2) \\ 2(x_1 - x_3) & 2(y_1 - y_3) & 2(z_1 - z_3) \\ 2(x_1 - x_4) & 2(y_1 - y_4) & 2(z_1 - z_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = R_2^2 - R_1^2 - x_2^2 + x_1^2 - y_2^2 + y_1^2 - z_2^2 + z_1^2 \\ \lambda_2 = R_3^2 - R_1^2 - x_3^2 + x_1^2 - y_3^2 + y_1^2 - z_3^2 + z_1^2 \\ \lambda_3 = R_4^2 - R_1^2 - x_4^2 + x_1^2 - y_4^2 + y_1^2 - z_4^2 + z_1^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $R_i$  为标签到各个基站的距离,  $(x_i, y_i, z_i)$  为 4 个基站的坐标。

## 2.2 基于高精度陀螺仪的惯性导航定位

惯性导航是指通过高精度的陀螺仪获取加速度,通过两次积分获取坐标信息的技术手段。虽然在惯性导航对陀螺仪的噪声十分敏感<sup>[12]</sup>,但是火场执行任务的时间是相对较短的,通常不会超过 24 h。

### 2.2.1 惯性导航硬件配置与基本原理

本文采用 YESENSE 公司的 YIS500 电磁陀螺仪。

行人惯性导航系统通常埋在被测行人的鞋中,主要算法通常分为步态检测与零速度更新(Zero Velocity Update, ZVU)<sup>[13]</sup>。

### 2.2.2 步态检测算法与零速度更新算法

本文采用的步态检测方法是建立一个窗口大小为 6 的滑框,每次计算滑框内的 X 轴角速度的方差和 Z 轴方向加速度的方差,若满足稳定条件,则可以认为步态处于静止状态,否则则认为处于其他状态。

步态检测算法可以用下式表示:

$$C = \begin{cases} 0, C = \text{True} \\ 1, C = \text{False} \end{cases}$$

$$D_{x\omega}^N \in [m_1, n_1] \cap D_{z\alpha}^N \in [m_2, n_2] \cap w_x^N \in [a_1, b_1] \cap a_z^N \in [a_2, b_2] \quad (7)$$

$$\hat{R} = \begin{cases} 0, C = \text{True} \\ 1, C = \text{False} \end{cases} \quad (8)$$

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

其中,  $R$  为检测结果序列, 0 表示静止状态, 1 表示其他状态。

由于加速度在全周期内都会有漂移, 本文采用的零速度更新方法, 不仅在  $\hat{R}=0$  的时间序列内默认速度向量  $\vec{v}_a=0$ , 而且还统计了惯性测量单元在这段时间内相对  $\vec{0}$  发生的漂移, 从而利用漂移量进行速度回归估计。

## 2.3 定位数据融合

本文提出一种按照准确度进行的线型加权的数据融合方法。由于惯性导航算法是较为稳定的, 则认为其误差和噪声不会在任务执行的过程中发生改变, 而 UWB 通信定位的误差会随着执行人员与基站的距离增加发生微弱的衰减。

选取 UWB 的 RSSI 值(信号强度)进行归一化处理, 获得归一化信号强度  $r$ , 认为其为 UWB 定位的可信度。最终位置公式有:

$$P_0=rP_1+(1-r)P_2 \quad (9)$$

其中,  $P_1$  为 UWB 定位获取的位置向量,  $P_2$  为惯性导航获取的位置向量。

通过 ARM 单片机进行上述计算后由 LoRa-170M 通信模块发送给 PC 端上位机。

## 3 无线通信传输的上位机监测系统

### 3.1 无线通信框架

通信框架方面选择采取以低频段的 LoRa-170M 通信协议进行无线通信。上位机软件方面主要由 LabVIEW 编写而成, 通过串口读取 LoRa-170M 的数据, 实时读取消防员的姿态信息及心率血氧信息, 当有消防员发生生命体征及动作行为的异常, 即通过弹窗进行报警。

### 3.2 消防员终端设计

上位机除了可以接收消防人员上传的信息, 还可以通过无线通信系统将消防人员间的位置信息进行共享, 并将相对位置信息呈现在腕表上。当有消防人员陷入险境时, 可借由上位机寻找其余消防人员并进行信息共享, 从而实现营救。消防员佩戴终端示意如图 6 所示。

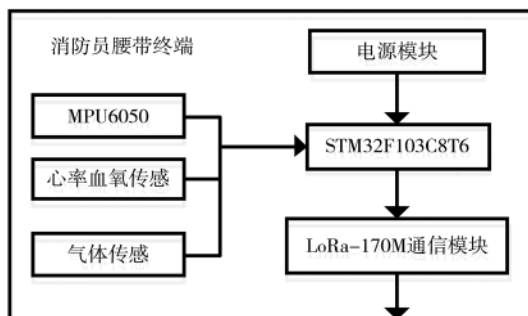


图 6 消防员终端示意图

## 4 实验与结果分析

### 4.1 LSTM 神经网络姿态判断

#### 4.1.1 实验配置及数据

本文 LSTM 神经网络姿态判断实验的硬件配置为 CPU Intel i7 7700, RAM 8 GB。

训练数据来自 UCI 大学的人类活动和姿势识别数据集, 实验数据来自佩戴含有 MPU6050 传感器的 5 个不同的行人, 5 个行人的数据及身体状况如表 2 所示。

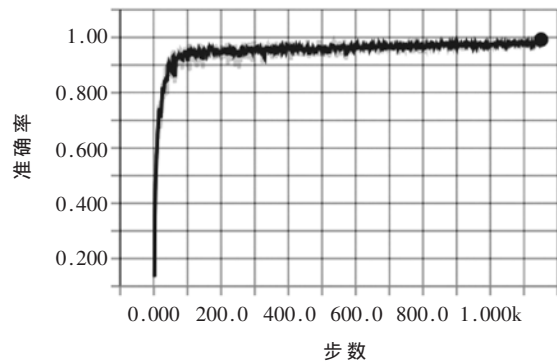
表 2 测试行人的数据及身体状况

编号	身高/cm	性别	佩戴位置/cm	体重/kg
1号	173	男	97.4	65.7
2号	181	男	105.2	77.5
3号	172	男	95.7	55.0
4号	163	女	86.0	52.3
5号	176	男	99.2	63.2

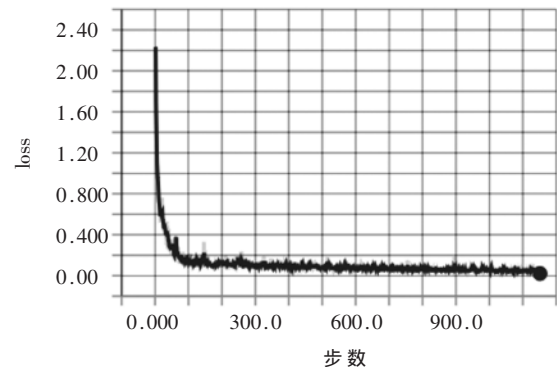
#### 4.1.2 实验过程与结果分析

本文在 Python 的 TensorFlow 平台上进行了 5 轮 LSTM 神经网络的训练, 每次训练 23 000 000 步, 第 3 轮的训练结果如图 7 所示, 在训练集上的准确率达到 97.2%, loss(损失函数)下降到 0.429, 训练总时长为 2 小时 43 分钟。

随后本文对 5 个不同的行人分别进行了静止、站立、静坐、上楼、下楼、静卧 6 项测试, 测试的时长为 10



(a) 训练过程中准确率变化



(b) 训练过程中损失函数变化

图 7 LSTM 第 3 次测试准确率及 loss 随训练次数的变化

# 测控技术与仪器仪表

Measurement Control Technology and Instruments

个时间序列段, 获得结果如表 3 所示。

表 3 6 项姿态测试准确率

姿态	静止	站立	静坐	上楼	下楼	静卧
准确率/%	94.54	92.72	94.67	89.36	87.33	95.84
置信度/ $\pm\%$	0.07	0.17	0.15	0.92	0.88	0.02

6 种状态的加权平均准确率在 92.41% 左右, 虽然上下楼的准确率要略低, 但应对火场环境中消防员的姿态检测已经足够。

## 4.2 UWB 测距及定位

### 4.2.1 实验配置及数据

本文 ARM 单片机选用 STM32F103C8T6, 时钟频率 72 MHz, Flash 容量 512 KB, 射频模块增益调整为 40 dB。本文共选取了隔墙和不隔墙两种环境下进行测试, 墙体为钢筋混凝土材料。

### 4.2.2 实验过程及结果分析

本文取两个基站, 设置每经过 1 s 返回一次数据, 每测试 3 min, 将两个基站之间的位置增大 500 cm, 共进行了 8 组不同距离下的测试, 经过 MATLAB 处理进行误差分析后获得结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 相对误差和绝对误差随着距离的增加没有一定的变化规律, 这说明 DS-TWR 的测量结果对空气距离是不敏感的, 这一点有利于系统在大型建筑之间进行铺设的构建。

随后为了验证隔墙的效果, 本文设计了对照实验, 分别在两个基站之间放置 25 cm、75 cm、125 cm 的墙体, 两两构成 3 个对照实验组, 经过 MATLAB 处理后, 获得

误差变化如图 9 所示。

当隔开 125 cm 5 堵墙体之后, 相对误差比较大, 但最高不超过 0.22; 当墙体在 3 堵以内时, 效果比较好, 相对误差不超过 0.15。同时不难发现, 经过墙体后所测得的基站间距离增加, 这是由于电磁波的绕射与衍射作用导致的。不仅如此, 因为增加的误差距离与墙体的厚度具有一定的线性关系, 可以通过软件校准来实现比较准确地测量。

## 5 结论

本文提出了一套基于无线通信框架的消防人员生命体征监测及营救系统, 采取多节点通信, 上位机处理数据, 并创新性地采取了 LSTM 神经网络用以判断消防员生命体征状态, UWB 融合惯性导航作为火场定位手段, 可以行之有效地降低消防人员进入火场之后的的死亡率。

### 参考文献

- [1] 公安部消防局. 中国消防年鉴[M]. 北京: 中国人事出版社, 2009.
- [2] 卢婷. 灭火救援中消防员伤亡原因分析与预防对策[J]. 消防技术与产品信息, 2015(3): 43-46.
- [3] 杨树峰, 隋虎林, 李志刚. 消防员生命体征监测系统设计与实现[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(3): 314-317.
- [4] 王庆辉, 金焯, 魏立峰, 等. 无线消防救援信息采集与监测系统[J]. 自动化仪表, 2014, 35(5): 26-29, 33.
- [5] 刘晓军. 灾害现场消防员状态监测系统设计与实现[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(10): 1427-1430.
- [6] 郑毅, 李凤, 张丽, 等. 基于长短时记忆网络的人体姿态检测方法[J]. 计算机应用, 2018, 38(6): 1568-1574.

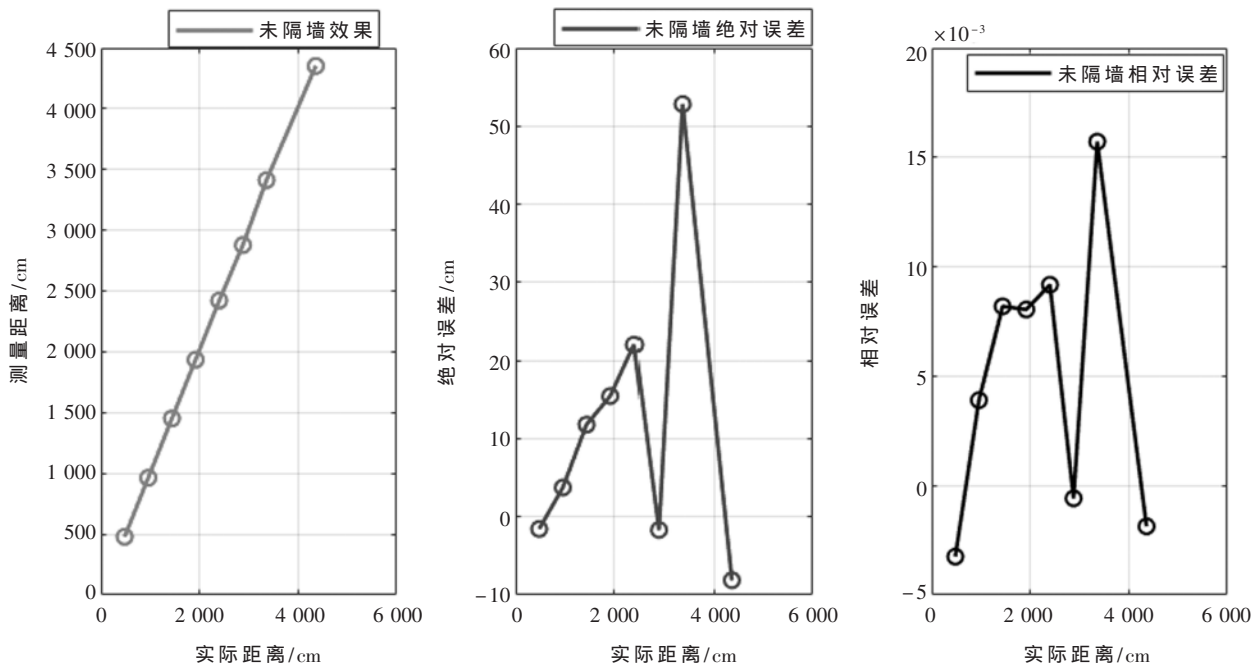


图 8 DS-TWR 未隔墙测距测试

# 测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

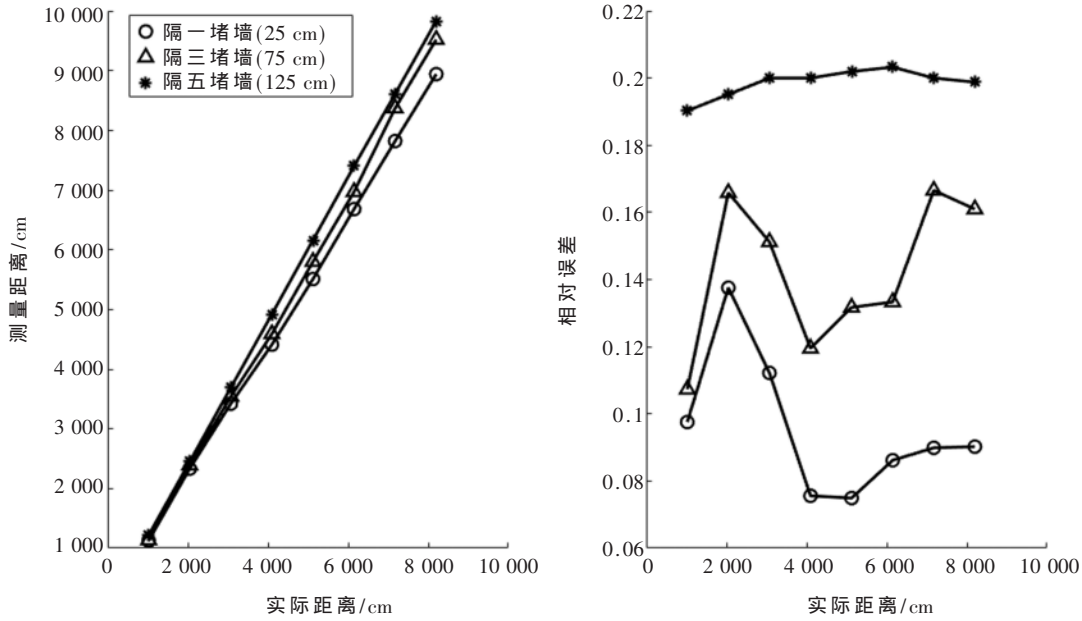


图9 DS-TWR 测距隔墙测试

[7] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.

[8] 张泓. 实时心率监测中的运动和噪声干扰消除方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.

[9] LEE C M, ZHANG Y T. Reduction of motion artifacts from photoplethysmographic recordings using a wavelet denoising approach[C]. IEEE EMBS Asian-Pacific Conference on Biomedical Engineering. IEEE, 2003: 194-195.

[10] 张令文, 杨刚. 超宽带室内定位关键技术[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(6): 706-713.

[11] 丁锐, 钱志鸿, 王雪. 基于 TOA 和 DOA 联合估计的 UWB 定位方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 313-317.

[12] 朱彩杰, 赵冬青, 杨洲. 基于 MEMS 的室内定位误差修正方法研究[J]. 测绘工程, 2017, 26(5): 57-61.

[13] 刘维, 王明杭, 朱志宇. 基于 MEMS 传感器的惯导系统预处理和姿态解算[J]. 传感技术学报, 2019, 32(11): 1677-1681.

(收稿日期: 2020-03-26)

### 作者简介:

王圣哲(1998-), 男, 本科, 主要研究方向: 嵌入式系统、机器学习。

王博(1999-), 男, 本科, 主要研究方向: 深度学习。

高鸣远(1997-), 男, 本科, 主要研究方向: 集成电路设计、数字信号处理。

刊号: ISSN 2096-5133  
CN10-1543/TP

## 欢迎订阅, 2021年度 《信息技术与网络安全》

中国科技期刊数据库来源期刊

主管单位: 中国电子信息产业集团有限公司 主办单位: 华北计算机系统工程研究所(中国电子信息产业集团有限公司第六研究所)

月刊 定价: **26元/期**

编辑部电话: (010) 66608908 66608981  
电话订阅: (010) 82306084  
邮局订阅: 邮发代号 82-417

广告

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所