

智能阿尔兹海默症患者及老人守护系统

孙傲杰^{1,2} 潘宇斌^{1,2} 陈磊^{1,2*}

1. 华北理工大学电气工程学院; 2. 河北省风光氢储安全监测与智能运行技术创新中心

摘要: 针对老龄化严重以及阿尔兹海默症患者数量增多等问题, 设计并研发一款基于 STM32F103C8T6 微控制器的智能眼镜守护系统, 通过 CAN 总线与 STM32F407 实现双机协同通信。该系统使用了多项创新技术: 采用高灵敏度脑电波传感器, 可实时检测用户神经信号并触发摄像头拍摄视觉画面。通过低功耗蓝牙模块与手机 App 连接, 用户可远程查看实时画面或回放历史影像。系统集成 GPS 定位功能, 可实时追踪位置信息。当检测到脑电波信号异常或中断时, 设备会立即启动二级警报机制。

关键词: STM32F103C8T6 微控制器; 脑电波传感器; 二级警报机制; 双通道无线传输

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.01.024

引言

随着老龄化进程的加速, 阿尔兹海默症患者的数量在持续增加, 中国现有约 1700 万阿尔茨海默病及其他痴呆患者, 占全球总数的近 30%。而科学技术的发展为“失智”老人提供了主动守护的可能性^[1]。本文主要设计并实现一款智能眼镜系统, 该系统集成脑电波读取模块和摄像头模块, 通过读取不同情绪时的脑电波对摄像头进行触发, 摄像头模块可记录不同情绪时用户所看画面; 配备 GPS (Global Positioning System) 定位模块、无线传输模块、CAN (Controller Area Network) 通信模块以及手机 App, 当脑电波模块检测^[2]到脑电波异常时, 触发蜂鸣器报警和手机信息推送。通过硬件电路设计与软件程序的协同开发, 系统成功将脑电波检测、视觉拍摄、GPS 定位、双机通信及多级警报功能整合为一体, 实现了神经信号异常与位置追踪的智能联动, 有效降低了对照护人员的持续依赖, 提升了阿尔茨海默症患者及老人的安全监护效率。

1 系统总体框架与工作原理

本系统采用双核异构协同控制架构^[3], 以 STM32F103C8T6 协处理器与 STM32F407VGT6 主控器为核心, 构建一个模块化、功能集成化的智能眼镜系统^[4]。该框架遵循“采集-处理-传输-响应”的协同控制逻辑。在采集层, 协处理器采用高灵敏度脑电波传感器对用户脑电波进行持续监测并获取其地理位置信息; 在处理层, 协处理器对接收到的脑电波以及位置等信息做初步处理之后再利用基于 CAN 2.0B 协议

的通信方式传送到主控器; 在传输层, 主控器完成图片压缩、存储等工作并且以无线网络 / 4G 两种方式进行数据上传云端服务器; 在响应层, 一旦发现有脑电信号出现异常或者消失, 则立刻触发二级报警模式^[5]即发出响声以及发送短信提醒到用户的手机上, 这一体系保证了协处理器能够良好配合主控器运行, 也即完成了整个自脑电波检测到远程预警的过程, 从而可以有效保护阿尔茨海默氏症患者以及老年人的生命安全。

2 系统建模与理论分析

为了阐明系统的各个部分是如何工作的以及为后续软件算法的设计奠定基础, 在此介绍了相应的数学模型。它们包括神经信号感受、数据分析以及安全反应等内容, 用于定量分析系统的运行情况以保证检测结果的真实可靠及反应迅速有效。

脑电波传感器采用高灵敏度电极采集神经电信号, 并转化为模拟电压输出。系统利用 STM32F103C8T6 内部 12 位 ADC 对该信号进行量化处理, 如式(1)所示。

$$V_{EEG} = \frac{D_{ADC}}{2^n - 1} \times V_{ref} \quad (1)$$

其中 D_{ADC} 为 ADC 转换得到的数字读数, $n=12$ 为 ADC 分辨率, $V_{ref}=3.3V$ 为参考电压。该模型将数字量映射为实际电压值, 而实际采集的信号需经仪表放大器 AD8232 进行千倍放大 (增益 $G=1000$), 并通过 4 阶 Butterworth 带通滤波器 (0.5-40Hz) 滤除工频干扰与肌电噪声, 滤波器的传递函数如式(2)所示。

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目 X2025166智能阿尔兹海默症患者及老人守护系统。

作者简介: 孙傲杰 (2004—), 女, 本科在读, 研究方向为测控技术与仪器。

潘宇斌 (2005—), 女, 本科在读, 研究方向为测控技术与仪器。

通讯作者: 陈磊 (1981—), 男, 副教授, 研究方向为检测技术及智能装置、人工智能技术、新能源发电及智能电网。

$$H(s) = G \cdot \omega_c^4 \left/ \begin{matrix} s^4 + 2.613\omega_c s^3 \\ + 3.414\omega_c^2 s^2 + \\ 2.613\omega_c^3 s + \omega_c^4 \end{matrix} \right. \quad (2)$$

其中, $\omega_c = 2\pi f_c$ 为截止角频率, f_c 取 40Hz 以保证脑电有效频段通过。

系统采用滑动窗快速傅里叶变换对滤波后的脑电信号进行频域特征提取。定义窗长为 256 点, 步进 64 点, 计算 θ 波 (4-8Hz) 与 β 波 (13-30Hz) 的能量比作为状态判据, 如式 (3) 所示。

$$R_{\text{能量}} = \frac{\sum_{f=4}^8 |X(f)|^2}{\sum_{f=13}^{30} |X(f)|^2} \quad (3)$$

式中, $X(f)$ 为 FFT 变换后的频域幅值。触发异常警报的条件定义为能量比连续 3 帧低于阈值 $R_{th}=0.7$, 或信号幅值持续低于噪声基底超过 5 秒。

GPS^[6] 模块通过接收 L1 波段卫星信号, 支持 50 通道的 GPS 引擎。系统解析 NMEA-0183 协议, 提取经度、纬度等信息。为提高定位精度, 采用扩展卡尔曼滤波融合 GPS^[7] 与惯性测量单元数据, 状态方程如式 (4) 所示, 观测方程如式 (5) 所示。

$$\mathbf{x}_k |_{k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1} |_{k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k |_{k-1} + \mathbf{v}_k \quad (5)$$

其中, 状态向量 $\mathbf{x} = [x, y, v_x, v_y]^T$ 包含位置与速度分量, \mathbf{F}_k 为状态转移矩阵, \mathbf{H}_k 为观测矩阵, \mathbf{w}_k 与 \mathbf{v}_k 分别为过程噪声与观测噪声。通过卡尔曼增益动态更新协方差矩阵, 实现亚米级定位精度。

摄像头^[8] 模块采用 OV2640 CMOS 图像传感器, 通过 DCMI (Digital Camera Interface) 接口与 STM32F407 连接。当协处理器通过 CAN 总线发送拍摄指令 (0xA1) 时, 主控器触发图像采集, 并启用硬件 JPEG (Joint Photographic Experts Group) 编码器进行压缩。JPEG^[9] 压缩基于离散余弦变换与量化矩阵分别如式 (6) 和式 (7) 所示。

$$F(u,v) = 1 \left/ \begin{matrix} 4C(u)C(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x,y) \\ \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{16} \right] \\ \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{16} \right] \end{matrix} \right. \quad (6)$$

$$\text{量化后系数} = \text{round} \left(\frac{F(u,v)}{Q(u,v)} \right) \quad (7)$$

其中 $f(x,y)$ 为 8×8 像素块的原始灰度值, $F(u,v)$ 为 DCT (Discrete Cosine Transform) 变换后的频域系数, $Q(u,v)$ 为标准量化矩阵 (质量因子 85), 压缩比可达 1:40。压缩后的 JPEG 图像通过 SDIO (Secure

Digital Input/Output) 接口写入 MicroSD 卡。

CAN^[10] 总线实现双核数据交互, 基于 2.0B 协议定义扩展帧格式。为保证高可靠性传输, 采用 CRC-15 校验算法, 生成多项式如式 (8) 所示。

$$G(x) = x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1 \quad (8)$$

校验码计算流程如式 (9) 所示。

$$\text{CRC} = \text{Rem} \left[\frac{x^{15} M(x)}{G(x)} \right] \quad (9)$$

其中, $M(x)$ 为待校验数据多项式, Rem 表示求余运算。通过该机制确保总线丢包率低于 0.001%。

无线传输模块 (ESP8266) 采用 TCP 长连接与手机 App 通信, 数据分片传输机制由 MTU 动态调整决定, 如式 (10) 所示。

$$N_{\text{frag}} = \left\lceil \frac{L_{\text{data}}}{MTU_{\text{dyn}}} \right\rceil \quad (10)$$

式中, L_{data} 为待发送数据总长度, MTU_{dyn} 为动态调整的最大传输单元。弱信号环境下启用前向纠错编码, 码率 1/2, 其编码关系如式 (11) 所示。

$$[c_1, c_2] = [m_1, m_1 \oplus m_2] \quad (11)$$

输入比特 m_1, m_2 生成两路编码输出 c_1, c_2 , 接收端通过维特比译码恢复原始数据, 确保误码率低于 0.01%。

系统采用双核异构架构, 协处理器 (STM32F103C8T6) 与主控器 (STM32F407VGT6) 通过 CAN 总线协同工作。任务调度采用截止期单调算法, 优先级根据任务截止时间动态分配, 如式 (12) 所示。

$$P_i = \frac{1}{D_i} \quad (12)$$

其中, P_i 为任务优先级, D_i 为任务截止时间。关键任务分配最高优先级, 确保响应延迟 $\leq 50\text{ms}$ 。该模型体系完整描述了从脑电感知、数据处理到安全响应的全过程, 为系统实现高实时性、低功耗与高可靠性提供了理论支撑。

3 实验分析

3.1 数据收集

本文主要对系统的基本功能进行测试, 包括神经信号获取、定位追踪、拍照以及无线通信等几个部分。对于神经信号获取的功能, 模拟不同的情绪所对应的脑电波情况, 然后对比 AD8232 模块获取并且由 STM32F103 进行处理的实时波形是否一致。对于定位以及成像功能, 在不同的环境中测试 GPS 模块的定位精度, 在不同的光线条件下用 OV2640 摄像头拍摄的照片的质量以及压缩率。对于报警以及通讯功能, 模拟脑电波出现异常而触发二级报警的情况, 记录下本地蜂鸣器的声音响起的时间差、手机端接收到报警信息的比例还

有 Wi-Fi 以及 4G 两种网络下上传下载文件的速度。所有的这些数据都是经过多次实验得到的结果，具有一定的代表性，也为之后的研究工作奠定了良好的基础。

3.2 传感器数据精度与稳定性分析

为保证系统的监测效果，制定了合理有效的测试方案，并在受控实验环境下对核心传感器模块进行了校准和性能测试工作。测试过程以高精度参考仪器为基准，重点考察传感器在不同工况下的跟踪能力和数据波动情况。为了准确评价系统检测模块的性能，对关键传感器进行了标定和重复性测试。通过与高精度参考设备对比，并计算多次测量的误差和标准差，进而验证了系统数据的可靠性和一致性。测试涵盖了正常情绪、悲伤情绪、喜悦情绪三种状态下的脑电波波动数据（见图 1—3），不同环境下的定位精度和图像压缩情况（见表 1）。

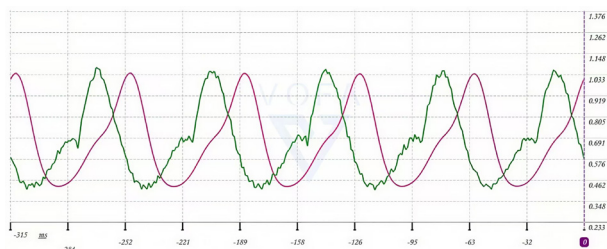


图 1 正常情绪下脑电波波动图

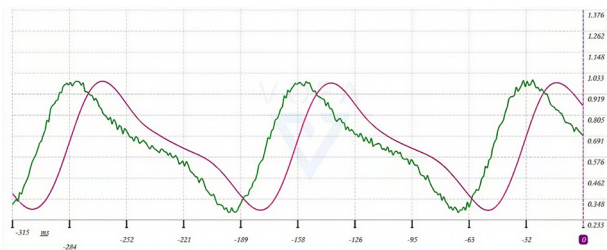


图 2 悲伤情绪下脑电波波动图

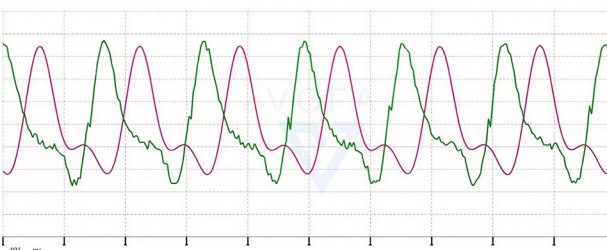


图 3 喜悦情绪下脑电波波动图

表 1 传感器测量精度与稳定性测试结果

测试条件	参数	参考值	平均测量值	平均误差	标准差
开阔地带	定位误差 (m)	0	2.3	+2.3	0.45
复杂环境	定位误差 (m)	0	5.8	+5.8	1.32
正常光照	图像信噪比 (dB)	40	38.5	-1.5	0.96
弱光环境	图像信噪比 (dB)	35	32.2	-2.8	1.45

如图所示，系统传感器表现出良好的性能。脑电波信号在不同情绪下均能准确反映能量变化，表明信号调理与特征提取算法具有较高的可靠性。GPS 定位在开阔地带精度较高，在复杂环境下虽有一定偏差，但仍能满足实时追踪需求。图像传感器在正常光照下信噪比接近参考值，弱光环境下略有下降但图像清晰度足以辨识关键视觉信息。各传感器的测量偏差均在预期范围内，其精度和稳定性完全满足系统进行状态判断和阈值报警的需求，为后续智能决策提供了可靠的数据基础，验证了其在实践应用中的有效性。

3.3 系统功能可靠性测试与分析

除传感器精度外，系统整体的可靠性对其实用价值至关重要。本节对脑电异常检测^[11-12]、警报触发、图像拍摄、定位追踪及无线通信等核心功能进行了压力测试和成功率统计。测试在各种场景下进行，包括模拟不同脑电波状态下的异常检测、不同环境下的定位追踪以及 Wi-Fi/4G 网络切换时的数据传输稳定性测试，并记录每次操作的最终状态。表 2 汇总了特定测试周期内各功能的测试结果和关键观察。

表 2 系统核心功能可靠性测试结果

功能模块	测试项目	测试次数	成功率
脑电检测与警报	异常状态识别	100	97%
	本地蜂鸣器触发	100	100%
图像采集	App 推送成功率	100	98%
	脑电触发拍摄	100	96%
	定时自动拍摄	100	100%
GPS 定位	图像存储完整性	200	99.5%
	位置更新频率	100	100%
	历史轨迹回放	50	98%
无线通信	Wi-Fi 数据传输	100	99%
	4G 数据传输	100	98%
	双通道自动切换	50	96%

表 2 显示系统核心功能具有很高的可靠性。脑电异常识别成功率达 97%，本地蜂鸣器触发率为 100%，App 推送成功率为 98%，表明二级警报机制运行稳定可靠。图像采集在脑电触发模式下成功率为 96%，定时拍摄模式下达到 100%，图像存储完整性

高达 99.5%，确保了关键视觉信息不丢失。GPS 定位更新频率稳定，历史轨迹回放成功率为 98%，满足实时追踪需求。无线通信^[13]方面，Wi-Fi 与 4G 双通道传输成功率均在 98% 以上，双通道自动切换成功率为 96%，确保了数据在复杂网络环境下的实时同步。测试中出现的少数失败案例主要源于环境干扰，均在系统容错设计允许范围内。这些测试结果充分证明了系统各功能模块的协调性和鲁棒性，表明其具备在复杂环境中稳定运行、可靠完成预期任务的能力。

4 结论

本研究针对阿尔兹海默症患者与老年群体的安全监护痛点，研发了一款基于双 STM32 微控制器的智能脑电触发式眼镜守护系统，完成了从软硬件架构设计、功能模块开发到系统集成调试的全流程研究，成功实现脑电信号监测、视觉画面采集、实时定位、无线数据交互及异常预警等核心功能，全面达成了项目设定的研究目标。

实测结果表明，该系统脑电信号量化噪声控制在 $0.5\mu\text{V}$ 以内，CAN 总线数据丢包率低于 0.001%，无线传输视距有效距离 $\geq 50\text{m}$ ，各项性能指标均满足实际应用需求，低功耗设计也进一步提升了设备的续航能力。本研究将脑机接口技术与可穿戴智能设备深度融合，创新设计脑电触发式视觉采集模式，不仅为阿尔兹海默症患者的记忆留存、走失预防及突发状况处置提供了新型技术方案，也为老年群体智能安全监护体系的构建提供了实践参考，拓展了人机交互技术在养老医疗领域的应用边界。

该智能守护系统兼具技术创新性与实际应用价值，在医疗监护、智慧养老等领域具备良好的推广潜力^[14]，也为物联网背景下智能可穿戴设备^[15]的研发与应用提供了新的思路。

参考文献：

- [1] 金戈. 阿尔茨海默病 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2021: 406.
- [2] 申澍楠, 赵浚伊, 尹金良, 等. 基于物联网的阿尔兹

海默病脑电波检测装置 [J/OL]. 天津理工大学学报, 1-6 [2026-03-08]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1374.n.20250521.1536.004>.

- [3] 王宜怀, 索明何, 王玉丽. 嵌入式技术基础与实践项目化教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2023: 182.
- [4] 杨淑婷. “记忆的守护者: 数字科技与阿尔兹海默症的较量” [C]// 广东省肿瘤康复学会. 2024 年《健康大湾区》科普论坛暨第六期健康科普作品征集活动作品集. 惠州市中心人民医院神经内科, 2024: 512-513.
- [5] 刘莹, 陈华竣. 基于脑电波监测的疲劳驾驶预防系统设计 [J]. 现代信息科技, 2025, 9(15): 194-198.
- [6] 谢锦华. BDS/GPS 数据融合定位解算算法的研究与实现 [D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [7] 陈出新, 周雨辰, 王晨晨, 等. 基于双频 GPS 定位和陀螺仪姿态解算与霍尔传感器的多数据融合滤波定位算法研究 [J]. 工业控制计算机, 2023, 36(8): 125-126+129.
- [8] 邹平吉. 嵌入式机器视觉信息采集系统设计研究 [J]. 信息记录材料, 2022, 23(11): 191-194.
- [9] 王强. 机器视觉与数字图像处理基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021: 210.
- [10] 康德龙. 物联网智能无线节点数据采集系统设计与实现 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [11] 王通. 阿尔兹海默症的大脑萎缩与脑网络的关系研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [12] 范焰, 姚丽丽. 基于功能磁共振成像的个体脑网络在阿尔兹海默症早期诊断中的应用 [J]. 生物医学工程研究, 2021, 40(2): 126-130+143.
- [13] 袁俊. 基于低功耗蓝牙的脑电信号采集与处理系统设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [14] 陆琦, 曾金艳, 顾蒙曦, 等. 智能可穿戴设备在临床护理中的应用现状与优化策略: 以无锡地区为例 [J]. 现代医院, 2026, 26(1): 122-125+131.
- [15] 何佳俪. 智能可穿戴设备在运动表现监测中的应用路径 [J]. 文体用品与科技, 2026(1): 137-139.