

基于便携式虹膜仪的医疗图像数据安全共享平台设计

李健

(徐州医科大学 信息化处, 江苏 徐州 221000)

摘要: 在当前的医疗事业中, 患者的部分医疗图像蕴含敏感的个人隐私信息, 直接上传到医疗信息系统中可能会造成个人隐私泄露; 针对该问题, 该文设计了一种基于便携式虹膜仪的医疗图像数据安全共享系统; 首先, 对虹膜仪采集到的图像定位, 利用离散傅里叶变换技术压缩图像, 然后提取图像有效特征, 采用拉普拉斯机制对所挑选的有效特征添加噪音, 使整个处理过程满足 ϵ -差分隐私; 最后, 将处理后的图像上传到医疗图像数据安全系统, 该系统分为客户端 I 与客户端 II, 客户端 I 能够实现传统功能, 包括医生给出诊断意见和患者了解自身病情等, 方便医生与患者的沟通; 客户端 II 能够实现安全分析功能, 即科研人员对此类病情的分析研究, 给出具体治疗方案, 方便此类病情患者的后续治疗; 结果显示, 该系统能够有效保护患者个人隐私信息, 且能够保持较好的数据可用性和鲁棒性。

关键词: 医疗图像; 隐私泄露; 傅里叶变换; 差分隐私

Design of Medical Image Data Safety Sharing Platform Based on Portable Iris Instrument

Li Jian

(Information Division, Xuzhou Medical University, Xuzhou 221000, China)

Abstract: In the current medical business, some medical images of patients contain sensitive personal information, and uploading them directly to the medical information system may cause personal privacy disclosure. To solve this problem, this paper designs a medical image data safety sharing system based on portable iris instrument. First, locate the image collected by the iris instrument, use the discrete Fourier transform technology to compress the image, and then extract the effective features of the image, use the Laplace mechanism to add noise to the selected effective features, so that the entire processing process meets ϵ -differential privacy. Finally, upload the processed image to the medical image data security system. The system is divided into client I and client II. Client I can achieve traditional functions, including doctors giving diagnosis opinions and patients understanding their own conditions, etc, which is convenient for doctors Communicate with patients; Client II can realize the safety analysis function, that is, scientific researchers analyze and study such diseases and give specific treatment plans to facilitate the subsequent treatment of patients with such diseases. The results show that the system can effectively protect patients' personal privacy information, and can maintain good data availability and robustness.

Keywords: medical images; privacy leakage; Fourier transform; differential privacy

0 引言

随着信息技术的快速发展与智能设备的普遍应用, 各个行业都会收集大量数据用于分析客户需求、企业发展方向等, 但是这些数据往往包含了用户的个人隐私数据, 简单删除用户的姓名、年龄等可以在一定程度上保护用户的隐私, 但很难抵抗背景攻击、频繁查询攻击。部分研究人员采用了同态加密、差分隐私等方法来保护用户隐私, 并取得了较好的效果。2006年, Dwork 等人^[1]提出差分隐私(differential privacy), 该方法是最早用于解决数据泄露的问

题, 在该方法的定义下, 数据集的添加或减少计算结果对于具体某条数据的变化影响较小。2009年, Gentry 等人^[2]提出全同步加密(homomorphic encryption), 该方法实现了在加密数据上进行任意计算, 但全同步加密方法不适用于深度学习模型, 计算复杂度较高, 实时性较差。

同态加密、差分隐私方法多用于保护空间数据、流数据等, 针对图像隐私保护的相关研究较少, 但人们获取图像的渠道日益丰富, 图像同样蕴含了大量个人敏感信息, 很有可能泄露个人隐私信息^[3-4]。比如, 攻击者可以通过收集大量的人脸图像判断是否为同一人, 通过分析能够得出该人的性别、家庭住址等敏感信息。Wright 等人^[5]将压缩感知应用到人脸识别, 该算法提出的改进高斯观测矩阵, 实现了对图像的多层 CS 采样编码, 达到了隐私保护的目, 对于被遮挡的人脸图像识别具有较高的准确度。张啸剑等人^[6]提出结合矩阵分解与差分隐私的人脸图像发布, 该算

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-07-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(6522000057); 江苏省高校自然科学基金(18KJB520049)。

作者简介: 李健(1985-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 实验师, 主要从事网络相关方向的研究。

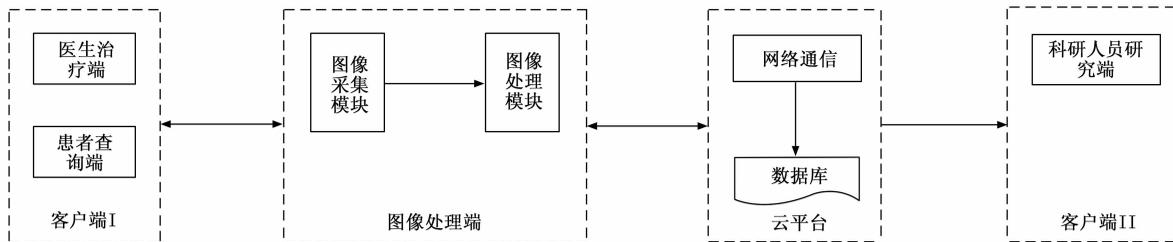


图 1 系统流程及模块划分图

法将低秩分解与奇异值分解结合对图像压缩，但隐私人脸特征重构图像存在较大问题，分类性较差。患者的医疗图像同样包含患者的个人隐私，上传到医疗信息系统中可能会造成个人隐私泄露。为此，该文提出了基于便携式虹膜仪的医疗图像数据安全共享系统，并结合实际病例，给出了系统的架构和具体实现方法^[7-8]。

1 平台架构及原理

医疗图像数据安全共享系统主要由客户端，图像处理端及云平台三部分组成。客户端 I 由医生、患者构成，客户端 II 由科研人员构成。图像处理端由图像采集模块，图像处理模块构成。云平台由网络通信与数据库构成。

该系统将采集到的图像数据实时传输到医生诊疗端，患者可通过查询入口及时了解医生诊断意见和患者自身病况，同时这部分采集到的数据经过离散傅里叶变换技术对图像进行压缩，将时域信息转换为频域信息，对图像有效特征提取傅里叶系数。采用拉普拉斯机制对此系数添加拉普拉斯噪音，形成噪音系数，该过程需要满足 ϵ - 差分隐私，从而保护图像数据的隐私信息。利用 GPRS/4G 网络上传至数据库，研究者可以通过接口提取处理后的图像开展研究。该文系统流程和算法流程分别如图 1、图 2 和表 1 所示。

表 1 该文算法流程

步骤 1 图像采集阶段

输入: 图像序列: H ;

输出: 医生诊断意见;

- (1) 便携式虹膜仪采集图像上传到客户端 I;
- (2) 医生通过采集到的图像分析得到患者病情诊断意见;
- (3) 患者通过患者查询端及时了解自身状况及医生诊断意见;

步骤 2 图像处理阶段

输入: 图像序列: H ; 参数 k , 隐私预算 ϵ ;

输出: 满足 ϵ -差分隐私的图像序列 H_1 ; 对图像序列 H 进行离散傅里叶变换; 提取 $l \times l$ 个傅里叶系数; 对提取的傅里叶系数添加拉普拉斯噪音; 对处理后的图像进行逆傅里叶变换重构图像, 得到 H_1 ;

通过网络通信模块上传到数据库;

研究者通过客户端 II 登录, 获取重构后的图像进行研究。

异构式平台。客户端 I、II 软件运行于嵌入式 ARM11 平台，操作系统采用 Linux；云平台上的数据库采用 DB-bridge。目前，DBbridge 已经支持 Oracle、TDSQL、TBase、MySQL、PostgreSQL 等多种数据库类型的迁移。网络通信服务基于 ICOP 通信模型，采用 TCP/IP 协议，支持云平台到处理端服务器及处理端服务器到客户端的无线和有线两种传输模式。客户端采用 Visual Studio.NET 移动开发平台，软件运行于 PC 机，客户端 I、II 均采用 C/S 架构与服务器建立连接，通过汇编语言 python 对图像进行压缩处理，处理过程满足 ϵ - 差分隐私。

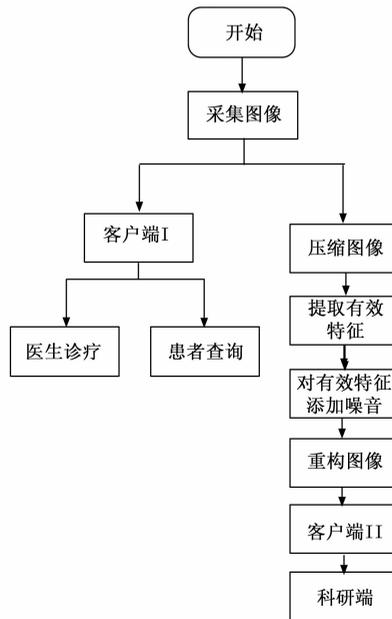


图 2 算法流程图

2 系统硬件设计

系统硬件设计分为两部分：图像采集模块，网络通信模块。图像采集模块用于采集患者的虹膜图像；网络通信模块能够将图像采集模块处理后的医疗图像及初始图像传送到数据库，并且通过登录客户端反馈不同的医疗图像。其硬件系统组成如图 3 所示。

图像处理是图像处理端的核心模块，以 ARM11S3C 44B0 控制芯片为核心，扩展 LED 显示模块，GPRS/4G 通信模块等，可初步实现对图像的处理、存储和传输功能。该系统对嵌入式 Linux 操作系统仅保留必需的功能模块，

为了充分将底层硬件和上层软件结合，系统开发采用

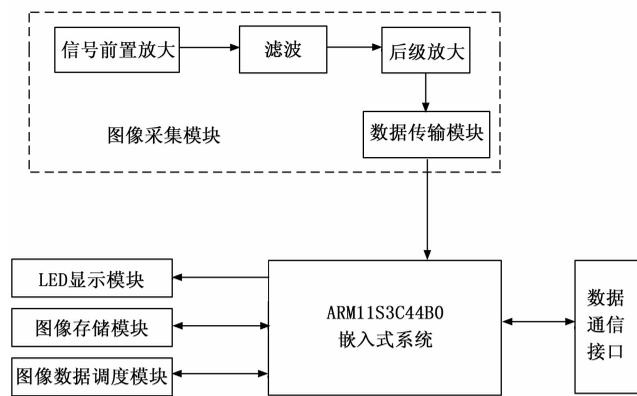


图 3 硬件系统组成图

使资源利用最大化。各硬件模块的实现如下。

2.1 图像采集模块的实现

图像采集模块由 PC 图像采集卡, PC 图像处理卡组成, PC 图像采集卡是控制摄像机拍照, 完成相机输出的视频信号的实时数据采集, 并提供与 PC 的高速接口, 是协调整个系统的重要设备; PC 图像处理卡在图像采集卡的基础上, 增加了图像分析、处理等功能。目的是提高图像信号的实时处理能力、降低主控系统在图像处理过程中对资源的要求, 从而提高系统整体处理能力。图像采集软件处理系统工作原理如图 4 所示。

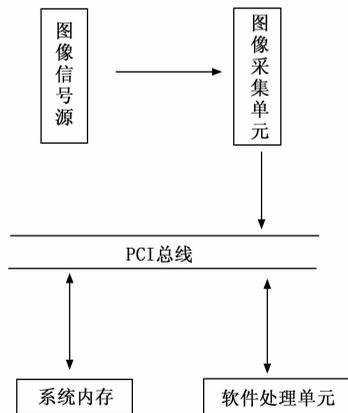


图 4 图像采集软件处理系统工作原理图

本设计的图像采集卡采用 PC104 板卡, PC104 板卡是基于 PC104 总线结构的彩色/黑白信号的图像采集卡, 支持四路复合视频输入, 可稳定接收来自各种视频源的标准信号, 其最高分辨率可达到 768×576 。由于系统无法对实际的图像对象进行直接处理, 因此首先需要用 A/D 转换芯片将图像对象的模拟信号转换成数字信号。

本设计的 A/D 转换芯片采用 AD7892, 它是一款高速、低功耗、12 位模数转换器 (ADC), 采用 +5 V 单电源供电。AD7892 内置一个 $1.47 \mu\text{s}$ 逐次逼近型 ADC、一个片内采样保持放大器、一个内部 +2.5 V 基准电压源和片内多功能接口结构, 并且提供两种数据输出格式可供选择: 单个

并行 12 位字或串行数据。快速总线访问时间和标准控制输入, 可确保该器件与微处理器和数字信号处理器轻松实现并行接口。通过高速串行接口, 可以与微控制器及数字信号处理器的串行端口直接连接。

2.2 网络通信模块的实现

图像处理端将采集到的患者图像进行处理, 添加噪音, 对图像进行隐私保护, 通过 GPRS/4G 网络上传至安全共享系统服务器的指定位置, 当医生需要诊断患者病情时, 由网络通信模块将便携式虹膜仪采集患者的医疗图像下载至医生治疗端, 医生治疗端对患者医疗图像进行分析并给出诊断意见; 患者通过登录患者查询端及时了解医生的诊断意见和患者自身健康状况; 研究者通过登录科研人员研究端, 下载处理后的患者医疗图像, 科研人员对此类病情的分析研究, 给出具体治疗方案, 方便此类病情患者的后续治疗。该模块主要实现了网络通信和图像存储与传输, 网络通信服务模块是安全共享平台的中枢系统, 主要功能是接收图像处理端的 TCP 连接, 同时将这些采集到图像存储到数据库。

3 基于差分隐私的图像处理方法

3.1 差分隐私

定义 1: 邻近数据集^[9]。设数据集 D 与 \tilde{D} , 具有相同的属性结构, 数据集 D 有 n 条数据, 则数据集 \tilde{D} 同样有 n 条数据, 两者有且仅有一条数据不一致, 则数据集 D 与 \tilde{D} 为邻近数据集。

对于输入图像序列 H , 将每一个像素点作为一个单元, 则图像序列 H 可以表示为一个二维矩阵 $A_{m \times n}$, 其中 m 表示矩阵的行数, n 表示矩阵的列数。

定义 2: 设便携式虹膜仪采集到一幅尺寸大小为 $m \times n$ 的图像, 则用矩阵可表示为:

$$A_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, a_{ij} 表示图像的任意一个像素点, 将矩阵 A 用向量表示, $\omega = [a_1, a_2, \dots, a_n]$, 若存在 $\tilde{\omega}$, 使其与 ω 仅相差一个向量, 则称 ω 与 $\tilde{\omega}$ 为近邻关系。结合定义 1 与定义 2, 给出 ϵ -差分隐私的形式化定义。

定义 3: 设有随机算法 M , P_M 为 M 的输出范围, 若算法 M 在任意的 ω 与 $\tilde{\omega}$ 上输出的结果 O 满足下列不等式, 则 M 满足 ϵ -差分隐私。

$$P_r(M(\omega) = O) \leq \exp(\epsilon) \times P_r(M(\tilde{\omega}) = O) \quad (2)$$

式中, ϵ 表示差分预算, 该值与算法 M 的隐私保护程度成反比关系, ϵ 越小表示算法 M 隐私保护效果更加鲁棒。常用的机制有拉普拉斯机制, 指数机制和高斯机制。该文采用拉普拉斯机制实现图像的差分隐私。

3.2 常用机制

3.2.1 拉普拉斯机制

拉普拉斯机制适用于连续型数据，加噪方式是对一个数字型数据添加一个随机的数字，改变原来的值，该文采用的图像是二维矩阵形式，利用拉普拉斯噪音对图像进行扰动，从而达到保护图像安全隐私的目的，设便携式虹膜仪采集到一幅尺寸大小为 $m \times n$ 的图像用向量表示为 $\omega = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ，采用拉普拉斯噪音对图像扰动后可得 $\tilde{\omega} = [\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n]$ ，其中， $\tilde{a}_j = a_j + \sum_{i=1}^m \text{lap}\left(\frac{\Delta\omega}{\epsilon}\right)$ ，由定义 3 可知该过程满足 ϵ -差分隐私^[10]。

3.2.2 指数机制

设随机算法 A，输入数据集 D ，输出为实体对象 $r \in \text{Range}$ ， $q(D, r) \rightarrow R$ 为可用性函数， Δq 为函数 $q(D, r) \rightarrow R$ 的敏感度。若算法 A 以正比于 $\exp\left(\frac{\epsilon q(D, r)}{2\Delta q}\right)$ 的概率从 Range 中选择并输入 r ，那么算法 A 满足 ϵ -差分隐私。概率密度函数为：

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x > 0$$

$$f(x) = 0, \quad x \leq 0$$

从式中可以看出，指数分布是分段分布。当 x 小于等于 0 时，函数结果为 0；当 x 大于 0 时，函数结果为 $\lambda e^{-\lambda x}$ 。

3.3 基于离散傅里叶变换的图像压缩方法

图像数据由矩阵形式表示，若对整幅图像采用拉普拉斯机制添加噪音，鲁棒性较差，如图 5 和图 6 所示。

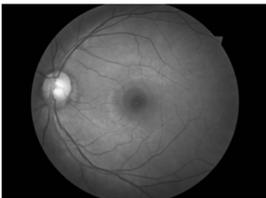


图 5 初始图像

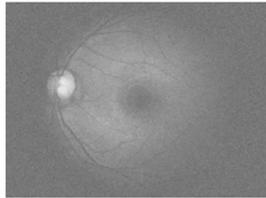


图 6 整体加噪后的图像

由图 5、6 可知，对整幅图像添加噪音后图像变得较为模糊，与初始图像相差较大，虽然达到了保护图像安全隐私的目的，但实用性较差，无法提供给研究者可用数据。由定义 2 可知，只需对该图像的部分特征进行加噪，保证该处理过程满足 ϵ -差分隐私，重构后的图像与初始图像相差较小，精度较为准确。

该文采用傅里叶变换^[11-12]首先对图像进行压缩，然后对压缩后的图像提取有效特征进行加噪。对于给定向量 $\omega = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ，进行傅里叶变换，提取有效特征中的 $l \times l$ 个傅里叶系数，形成系数向量 $F^l = (F_1, F_2, \dots, F_l)$ ，采用拉普拉斯机制对系数向量 F^l 添加拉普拉斯噪音，形成系数噪音向量，由 2.2 可知， $\tilde{F}^l = (\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \dots, \tilde{F}_l)$ ，其中， $\tilde{F}_j = F_j + \text{lap}\left(\frac{\Delta F^l}{\epsilon}\right)$ ，对添加噪音后的傅里叶系数进行逆傅里叶变换，得到重构向量 $\tilde{\omega} = [\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n]$ ，该过程满足 ϵ -差分隐

私。该方法算法流程如下：

输入：图像序列： H ；参数 k ，隐私预算 ϵ ；

输出：满足 ϵ -差分隐私的图像序列 H_1 ；

(1) $F^l \leftarrow DFT(\omega)$ //对初始图像进行傅里叶变换；

(2) $F^l \leftarrow F^l (1 \leq l \leq \alpha)$ //对变换后的图像提取有效特征中的 $l \times l$ 个傅里叶系数；

(3) 利用指数机制中公式 $\exp\left(\frac{\epsilon q(D, r)}{2\Delta q}\right)$ 选用有效特征中合适的 l 值；

(4) $\tilde{F}^l = [F_1, F_2, \dots, F_l]$ //对提取的系数添加拉普拉斯噪音；

(5) $\tilde{F}_j = F_j + \text{lap}\left(\frac{\Delta F^l}{\epsilon}\right)$ //添加拉普拉斯噪音后的傅里叶系数；

(6) 对 \tilde{F}_j 进行补 0；

(7) Return $\tilde{\omega} \leftarrow IDFT(\tilde{F}_j)$ //进行逆傅里叶变换，得到重构图像向量 $\tilde{\omega}$ 。

4 系统运行结果与分析

根据上述系统设计方案，设计出基于便携式虹膜仪的医疗图像数据安全共享系统，为了验证该系统的可行性，需要进行一次仿真实验，使用公共数据库图像数据进行实验对比。在 python3.7 的环境下搭建基于便携式虹膜仪的医疗图像数据安全共享系统仿真系统，实验步骤如下：

- 1) 虹膜仪采集患者医疗图像，该图像采集后直接上传到客户端 I；
- 2) 医生登录客户端 I，给出诊断结果；
- 3) 患者登录客户端 I，查询诊断意见；
- 4) 采集的医疗图像经过傅里叶变换得到该图像的频谱数据；
- 5) 提取有效数据进行加噪，对添加噪音后的频谱数据进行逆傅里叶变换，得到重构图像；
- 6) 科研人员登录客户端 II，获取重构后的图像进行研究。

具体实验结果如下：

图 7 为便携式虹膜仪采集的初始图像，该图像采集后直接上传到客户端 I，医生通过该图像进行分析给出诊疗意见，患者通过查询端登录客户端 I，查询医生诊断意见，历史诊断查询结果等，及时了解自身健康状况，配合治疗，保证患者病情得到有效控制。图 8 为处理后图像，为了保证患者隐私数据的安全共享，在此图像上传到云平台数据库之前，利用差分隐私算法进行加噪处理，同时保证图像

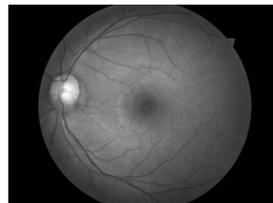


图 7 初始图像

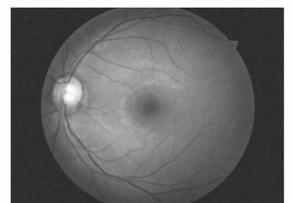


图 8 系统处理后的图像

数据的高可用性, 该部分图像被科研人员研究分析, 对此类疾病分析得到长期治疗方案。从实验结果可知, 该系统能够实现采集满足 ϵ -差分隐私的医疗图像, 具有较好的可用性与实用性, 并且为医疗图像数据安全设计平台提供了新的指导方法, 能有效地用于医疗系统领域。

5 结束语

基于便携式虹膜仪的医疗图像数据安全共享系统不仅能够满足医生的快速诊疗需求, 同时满足了患者及时了解病情的需求, 此外, 利用差分隐私算法处理后的图像数据还能够满足研究者的科研需求。该平台的设计能够实时处理医生与患者的需求, 保存大量的医疗数据, 并确保患者的医疗图像隐私不被泄露。实验结果表明, 该文设计的系统功能完善, 鲁棒性强, 图像采集传输准确并且安全, 具有较大的理论价值及实践意义。

参考文献:

- [1] Dwork C, McSherry F, Nissim K, et al. Calibrating noise to sensitivity in private data analysis [A]. Pro. of the 3rd Theory of Cryptography Conf [C]. Berlin: Springer, 2006: 265-284.
- [2] Gentry C. Fully homomorphic encryption using ideal lattices [A]. Proc of the 41st Annual ACM Symp. on Theory of Computing [C]. New York: ACM, 2009: 169-178.

(上接第 194 页)

分析数据我们可以发现在选取不同的时间间隔、水位变化和距离变化参数后, 数据量减少 95% 以上。这是由于各参数的间隔段可以把重复的数据滤除, 抽取关键数据点, 抽取的关键数据点对滤除掉的数据具有代表性, 表示在此时间段内船舶信息的关键参数, 抽取的数据点组成的船舶轨迹与原始数据组成的船舶轨迹基本一致。通过测试, 采用少量数据表达船舶倾侧各状态, 有效降低重复数据的显示问题, 同时减少了计算机内存的占用, 降低了计算机的配置和运行成本, 监管人员更方便、高效地进行倾废监管, 满足了工程设计需求。

5 结束语

该设计方案已在海洋倾废监管中得到系统级验证, 对提高海洋倾废监管效率起到了关键性作用。采用时间间隔、水位变化和距离变化作为数据抽稀算法的参数, 既能在通信服务器数据库中存储原始数据, 又能使图形显示的数据量减少 95% 以上, 有效提升船舶轨迹的简洁度, 在工程实际应用上具有明显优势。该设计方案对提高海洋倾废监管具有较高的通用性设计意义, 后期还需深入研究基于数据抽稀算法的船舶倾废状态的自动判别, 提高海洋倾废监管的智能化水平。

参考文献:

- [1] 高 专. 海洋倾废管理的现状和未来 [J]. 交通环保, 1995 (4): 25-29.

- [3] 熊 平, 朱天清, 王晓峰. 差分隐私保护及其应用 [J]. 计算机学报, 2014, 37 (1): 101-122.
- [4] 张啸剑, 付聪聪, 孟小峰. 面向人脸图像发布的差分隐私保护 [J]. 中国图象图形学报, 2018 (9): 1305-1315.
- [5] Wright J, Yang A Y, Ganesh A, et al. Robust face recognition via sparse representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 31 (2): 210-227.
- [6] 张啸剑, 付聪聪, 孟小峰. 结合矩阵分解与差分隐私的人脸图像发布 [J]. 中国图象图形学报, 2020, 25 (4): 655-668.
- [7] 张 季, 赵玉兰, 董 庆, 等. 大型病患智能远程电子监控系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 60-63.
- [8] 陈红玲, 郎六琪, 刘立勋, 等. 远程医疗监护诊断异构系统的集成实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 3929-3931.
- [9] 刘俊旭, 孟小峰. 机器学习的隐私保护研究综述 [J]. 计算机研究与发展, 2020, 57 (2): 346-362.
- [10] 兰丽辉, 鞠时光. 基于差分隐私的权重社会网络隐私保护 [J]. 通信学报, 2015 (9): 149-163.
- [11] 于万波, 王香香, 王大庆. 基于离散余弦变换基函数迭代的人脸图像识别 [J]. 图学学报, 2020 (1): 88-92.
- [12] 王彦杰. 离散傅里叶变换在实际中的应用 [J]. 宁德师范学院学报: 自然科学版, 2019 (4): 337-343.

- [2] 张和庆. 中国海洋倾废历史与管理现状 [J]. 湛江海洋大学学报, 2003 (5): 15-23.
- [3] 姚俊颖. 我国海洋倾废概念范围的不足及完善 [J]. 湖南社会科学, 2016 (4): 94-98.
- [4] 张和庆. 中国海洋倾废历史与管理现状 [J]. 湛江海洋大学学报, 2003 (5): 15-23.
- [5] 简花平. 中国南海区海洋倾废管理问题研究 [J]. 学理论, 2015 (36): 16-17.
- [6] 苟英英. 我国海洋倾废执法现状与改进对策研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 9-24.
- [7] 金山城. 基于 STM32 的智慧路灯控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (6): 94-98.
- [8] 赖华尧. 一种低功耗地下水监测仪器的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 282-285.
- [9] 陶兴安. 北斗卫星通信蓝牙终端设计 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017: 35-38.
- [10] 苑伟政. 硅微机械谐振压力传感器技术发展 [J]. 机械工程学学报, 2013, 49 (20): 2-9.
- [11] 徐旭东. 水体悬浮物采样器设计及其监控系统研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 29-30.
- [12] 陈 宏. 基于 GPS 的农田信息采集系统研究 [J]. 国外电子测量技术, 2018, 37 (3): 97-102.
- [13] 徐建明, 潘湘飞. 基于 Socket 通信的工业机器人监控系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (7): 70-73.
- [14] 潘 翔. 移动 GIS 多层空间非线性抽稀回溯算法分析 [J]. 河池学院学报, 2015, 35 (5): 62-67.