

分类号：
学 号：20222108033

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学 硕士学位论文



基于深度典型关联分析孪生网络的离线手写签名鉴定系统设计与实现

学 位 申 请 人	郑礼东
指 导 教 师	郑煜辰副教授
申 请 学 位 类 别	专业硕士
专 业 名 称	电子信息
研 究 领 域	计算机技术
所 在 学 院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号：
学号：20222108033

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学 硕士学位论文



基于深度典型关联分析孪生网络的离线手写签名鉴定系统设计与实现

学位申请人	郑礼东
指导教师	郑煜辰副教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子

2025年05月

**Research and implementation of deep canonical correlation analysis
siamese network-based handwritten signature verification system**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Professional

By

Zheng Li-dong
(**Electronic Information**)

Dissertation Supervisor: Prof. Zheng Yu-chen

May. 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 郑礼东 时间： 2025年5月26日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名 郑礼东 时间： 2025年5月26日

导师签名： 郑礼东 时间： 2025年5月26日

摘要

在当今数字化的时代，数据泄露和隐私侵犯等引起的互联网应用安全问题不断地在人们日常生活中不断体现。手写签名作为人体固有的生物特征之一，经常被用作个人身份识别的方法，例如商业交易、银行程序等。但是由于手写签名本身具有易伪造性，特别是离线手写签名缺失签名过程中的动态信息，使得自动化鉴别离线手写签名变得异常艰难。因此，本文基于典型关联分析和孪生网络方法展开针对真实签名和伪造签名微区别特征学习的研究与应用，进行了以下工作：

(1) 基于典型关联分析孪生网络的离线手写签名鉴定。针对已有的工作在离线手写签名鉴定鉴定研究中，基于孪生网络构造签名组合不够全面，衡量签名之间的相关性方法较为简单，在离线手写签名鉴定任务中取得的鉴定性能表现有限，本文提出了一种新颖的基于典型关联分析的独立于作者的孪生网络架构，用于学习不同签名组合之间的区别性特征。具体来说，本次研究工作首先构建三种类型的签名组合：真实-真实、真实-伪造、伪造-伪造。然后，将不同的签名组合输入设计的孪生网络中同时提取特征，通过典型关联分析和基于分类的损失函数进行模型训练。网络训练完成后，将基于典型关联分析孪生网络训练好的模型作为特征提取器提取签名特征，并使用依赖于作者的分类器构建一个完整的鉴定系统。所提出的方法能够学习到不同签名组合之间的判别性特征，取得了最优的或具有竞争力的性能表现。此外，所提出的方法具有良好的泛化能力，能够轻松迁移到不同语言的数据集中。

(2) 混合 Transformer 和卷积神经网络的离线手写签名鉴定。针对传统的卷积神经网络和 Transformer 难以单独捕捉签名的全局和局部特征，且单一深度模型往往面临过拟合和泛化能力差的问题。为了解决这些困难，本文提出了一种新颖的混合 Transformer 与卷积的签名网络，旨在通过自注意力机制和感受野机制捕捉签名的多尺度特征。具体而言，混合网络是一个创新框架，由两部分组成：基于 Transformer 模块和复合卷积模块，提取签名的多尺度特征，这种特征不仅包含了签名图像的全局特征而且还包含了签名图像的局部特征。混合网络在关注真实签名和熟练伪造签名之间的微变形特征表现出了极强的能力。所提出的方法在四个公共签名数据集（GPDSSynthetic、CEDAR、UTSig 和 BHSig260）上进行了大量实验，结果表明 HTCSigNet 能够学习到真实签名与熟练伪造签名之间的微区别特征，达到了最优的或具有竞争力的验证性能，并在模型泛化方面取得了先进的表现。

(3) 典型关联分析孪生网络签名鉴定系统。对基于典型关联分析孪生网络的离线手写签名鉴定和混合 Transformer 和卷积神经网络的离线手写签名鉴定研究工作进行集成，开发一款用户操作简单，鉴定准确率高的自动化离线手写签名鉴定系统。该系统以 flask、MySQL、Pytorch、Vue 等技术对模型进行集成，编写用户交互页面，设计接口，为签名鉴定者提供鉴定服务。

关键词：离线手写签名鉴定；特征学习；典型关联分析；卷积神经网络；Transformer

Abstract

In the current digital era, security issues in internet applications, such as data breaches and privacy violations, are increasingly manifesting in the daily lives of people. Handwritten signatures, as an inherent biometric characteristic of individuals, are frequently used for personal identity verification in scenarios such as commercial transactions and banking procedures. However, handwritten signatures are inherently susceptible to forgery, especially offline handwritten signatures, which lack dynamic information from the signing process, making automated verification exceptionally challenging. Therefore, this work conducts research and application on the fine-grained feature learning of genuine and forged signatures based on canonical correlation analysis and Siamese networks. The main contributions of this work are as follows:

(1) Canonical correlation analysis-based Siamese network for offline signature verification. In existing research on offline handwritten signature verification, the construction of signature pairs based on Siamese networks is often insufficiently comprehensive, and the methods used to measure the correlation between signatures are relatively simple, leading to limited verification performance. To address these issues, this thesis proposes a novel writer-independent Siamese network architecture based on Canonical Correlation Analysis (CCA) to learn discriminative features between different signature pairs. Specifically, this study first constructs three types of signature pairs: genuine-genuine, genuine-forged, and forged-forged. These signature pairs are then fed into the designed Siamese network to extract features simultaneously. The model is trained using canonical correlation analysis and a classification-based loss function. After training, the CCA-Siamese network serves as a feature extractor for signature feature extraction, and a writer-dependent classifier is employed to build a complete verification system.

(2) Hybrid Transformer and convolution signature network for offline signature verification. Traditional Convolutional Neural Networks (CNNs) and Transformers struggle to independently capture both global and local features of signatures. Moreover, single deep models often face challenges such as overfitting and poor generalization ability. To address these issues, this thesis proposes a novel hybrid signature network that integrates Transformers and convolutional layers, aiming to capture multi-scale signature features through self-attention and receptive field mechanisms. Specifically, the hybrid network introduces an innovative framework consisting of two main components: a Transformer-based module and a composite convolutional module. These components work together to extract multi-scale signature features, encompassing both the global structure and fine-grained local details of signature images. The hybrid network demonstrates a strong capability in identifying subtle deformation features between genuine and skilled forged signatures. Extensive experiments were conducted on four public signature datasets (GPDSsynthetic, CEDAR, UTSig, and BHSig260). The results show that HTCSigNet effectively learns fine-grained differences between

genuine and skilled forged signatures, achieving optimal or competitive verification performance while demonstrating advanced generalization capabilities.

(3) Canonical correlation analysis Siamese network-based signature verification system. This work integrates the research on offline handwritten signature verification using canonical correlation analysis Siamese networks and hybrid Transformer-CNN models to develop an automated offline handwritten signature verification system that is user-friendly and provides high accuracy in verification. The system integrates the model using technologies such as Flask, MySQL, PyTorch, and Vue, and includes the development of a user interaction interface and API design to offer verification services to signature verifiers. This system aims to provide a seamless, efficient solution for the automated verification of handwritten signatures with high precision.

Key words: offline handwritten signature verification; feature learning; canonical correlation analysis; convolutional neural networks; transformer

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 离线手写签名鉴定研究现状.....	2
1.2.2 深度特征提取研究现状.....	3
1.2.3 研究评述.....	4
1.3 研究目标与研究内容.....	5
1.3.1 研究目标.....	5
1.3.2 研究内容.....	5
1.3.3 技术路线.....	6
1.4 论文结构安排.....	7
第 2 章 离线手写签名鉴定相关理论.....	9
2.1 实验数据集与数据预处理.....	9
2.1.1 实验数据集.....	9
2.1.2 数据预处理.....	10
2.2 离线手写签名特征提取相关理论.....	11
2.2.1 典型关联分析.....	11
2.2.2 卷积神经网络.....	11
2.2.3 Vison Transformer.....	12
2.2.4 空间到深度卷积.....	13
2.2.5 通道-空间特征重建.....	14
2.2.6 孪生网络.....	15
2.3 基于分类的交叉熵损失.....	15
2.4 签名鉴定器.....	16
2.5 评价指标.....	17
2.6 本章小结.....	17

第 3 章 基于深度典型关联分析孪生网络的离线手写签名鉴定	18
3.1 概述	18
3.2 深度典型关联分析孪生网络特征提取模型	19
3.3 实验设置	21
3.3.1 实验设计	21
3.3.2 超参数设定	21
3.3.3 实验结果	22
3.3.4 特征可视化	25
3.3.5 消融实验	27
3.4 本章小结	29
第 4 章 混合 Transformer 和卷积神经网络的离线手写签名鉴定	30
4.1 概述	30
4.2 混合卷积神经网络和 Transformer 的特征提取模型	30
4.3 实验结果分析与讨论	33
4.3.1 实验设置	33
4.3.2 实验结果	33
4.3.3 消融实验	38
4.4 本章小结	40
第 5 章 离线手写签名鉴定系统的实现	42
5.1 系统设计	42
5.1.1 总体设计	42
5.1.2 功能设计	43
5.1.3 数据库设计	43
5.2 典型关联分析孪生网络签名鉴定系统实现与展示	44
5.2.1 用户模型构建功能	44
5.2.2 用户签名鉴定功能	45
5.3 软硬件支持环境	46
5.4 本章小结	47
第 6 章 结论与展望	48
6.1 结论	48
6.2 展望	49
参考文献	50
作者简介	56
致谢	58

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

在当今数字化时代，互联网应用安全日益成为至关重要的议题。随着人们在互联网上进行各种活动，从个人隐私到金融交易，安全性变得不可或缺。互联网应用安全涵盖了多个方面，包括数据保护、身份验证、网络防御等。恶意黑客和网络犯罪分子的存在使得我们必须保持警惕，采取措施保护我们的个人信息和敏感数据。数据泄露和隐私侵犯已经成为网络世界中的现实问题，因此互联网应用的开发者必须考虑如何保护用户的个人数据。采取加密措施、强化访问权限、定期更新软件以修复漏洞都是确保数据安全的重要手段。

在这个数字化时代，保护互联网应用的安全性变得至关重要。然而，随着科技的不断进步，恶意攻击和数据窃取方式不断迭代更新，所引发的安全问题也变得愈发复杂。正因为如此，信息安全专业人士和技术开发者必须不断寻求创新的方法来确保我们在数字世界中的安全。在互联网应用安全的范围内，有一个领域显得特别引人注目，那就是手写签名鉴定。手写签名鉴定是一个关键的领域，涉及到识别和鉴定个人签名的真实性。无论是在金融交易、文件认证还是身份鉴定方面，手写签名都扮演着重要的角色。然而，随着技术的发展，伪造签名的技巧也在不断进步，这使得手写签名的鉴定变得更加复杂和关键。因此，像互联网应用安全一样，手写签名鉴定也需要借助创新的技术和方法来保护个人和机构免受风险。

手写签名鉴定领域在过去几十年里得到了广泛研究，但仍然是一个尚未解决的研究问题。签名鉴定系统的目的是区分一个给定的签名是真实的还是伪造的。依据对手写签名的不同的采集方式，将手写签名鉴定任务分为两种方式，一种是在线手写签名鉴定，另外一种为离线手写签名鉴定。与在线签名采集方式相比，离线签名采集过程中丢失签名书写过程中生成的动态信息，这些动态信息对签名鉴定的性能至关重要。然而，离线签名鉴定的采集不需要特殊的物理输入设备，在真实场景中具有更广泛的应用范围和更高的应用价值。

通常情况下，签名伪造方式存在以下三种类型：

- 随机伪造：伪造者知道签名者的名字，但没有任何先前的样本。
- 简单伪造：伪造者在签名上没有任何关于签名的信息。

- 熟练伪造：伪造者知道真实签名的名字和形式。

随机伪造签名与真实签名完全不同来自目标用户且易于识别。简单伪造是通过一种由知晓原始签名形状但未经大量练习的人所书写签名样本体现的^[1]。简单的伪造也很容易区分，因为写作风格大多不同于原始的真实签名。熟练的伪造是最难区分的，因为模仿者了解真迹签名的书写过程，模仿者可以练习模仿很多次，这使得签名鉴定任务极具挑战性。因此，学习与捕获真实签名和熟练签名之间的微小区别是离线手写签名鉴定任务中的核心。

1.1.2 研究意义

手写签名是各种金融、法律和行政程序中最广泛和被接受的个人身份验证方法。为了确保文件的安全性并保证所有商业和法律活动的安全性，人们一直在致力于鉴定手写签名的真伪性。一般来说，签名鉴定通过将质疑的签名与相关的真实签名进行组合，以确定质疑的签名是否真实或伪造。尽管签名鉴定长期以来一直是人工进行的，但互联网的快速增长、文件的数字化以及在线交易的兴起，使得自动签名鉴定成为一项基本要求^[2]。2022年1月12日发布的国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知文中总结了我国在“十三五”期间数字经济的发展情况，并制定了详细的发展目标。在持续提升公共服务数字化水平中明确指出加快数字身份统一认证和电子证照、电子签章、电子公文等互信互认，推进发票电子化改革。对于电子证照、电子签章、电子公章和电子发票中都蕴含着代表个体身份的电子手写签名，同时这些签名是通过扫描设备并以图片的形式展现给我们，缺失一些至关重要的动态信息^[3]。所以，对于离线手写签名的鉴定研究有着重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

离线手写签名鉴定作为信息安全的重要组成部分，其应用场景与风险挑战不断提升，近年来不断地受到国内外研究者的青睐，大量的离线手写签名鉴定研究工作不断展开。针对于本次研究工作本小节将分为两部分对现阶段离线手写签名鉴定国内外研究现状进行介绍：（1）离线手写签名鉴定研究现状；（2）深度特征提取研究现状。

1.2.1 离线手写签名鉴定研究现状

离线手写签名鉴定作为人们工作生活中的重要组成部分经历了漫长的发展过程，特别是继深度学习技术之后，大量的创新型的研究工作逐渐发表。离线签名验证是一个非常活跃的领域，许多验证系统侧重于处理不同的问题，比如预处理^[4]、特征提取^[5-9]、构建鉴定器^[10, 11]等等。许多综述论文从不同视角对各类验证系统进行了总结^[3, 12, 13]。

此外，在不同的国际会议上举办了许多签名验证竞赛，以推动该领域的发展，并且也有许多新颖的验证系统被提出来^[14-16]。

最新的一些研究中重点在于基于深度学习的方法处理不同类型的离线签名验证问题^[10, 17-24]。Maruyama 等人^[17]提出了一种能够对用于在图像和特征空间中生成离线签名的最常见书写者可变特征进行自动建模的方法，并训练一个自动签名验证系统。Jiang 等人^[19]将循环生成对抗网络应用于风格迁移领域，利用在线数据生成逼真的离线签名，并且提出了一种名为 SigCNN 的新方法，该方法在训练时无需熟练伪造样本。为克服缺乏足够真实签名的问题，Dhieb 等人^[20]提出了一种在特征层面生成合成样本的数据增强方案。Ji 等人^[10]引入了配对对比特征，将一对输入样本（查询签名和参考签名）作为单个特征来处理。利用带有配对对比特征的拒绝学习以及带有配对对比特征的排序学习能够实现可靠的验证。Hafeman 等人^[22]开展了一项研究，分析了离线手写签名验证系统面临的对抗性攻击，揭示了针对真实签名和伪造签名的攻击之间的不对称性，并证明了即便在知识有限的情况下，此类攻击也能够成功。为了解决真实签名数据不足的问题，Arab 等人^[20]提出了一种新颖的数据增强技术，该技术直接将增强应用于特征，通过人工免疫系统中固有的突变、克隆和资源竞争机制生成更多相关的合成特征。Longjam 等人^[25]提出了一种开创性的离线签名验证方法，该方法使用了一种混合深度学习网络，结合了卷积神经网络和双向长短期记忆网络（Bidirectional Long Short Term Memory, BiLSTM），通过从签名图像中提取并分类多样化的特征，以准确区分真实签名和高技能伪造签名。

1.2.2 深度特征提取研究现状

在深度特征提取方法之前，研究者使用手工特征提取算法提取签名特征用于鉴定。传统的手工特征提取包括局部二值模式（Local Binary Pattern, LBP）^[26]、灰度共生矩阵（Grey-Level Co-occurrence Matrix, GLCM）和 DAISY^[27]等方法被用于从不同签名中提取纹理特征。此外，还有一些基于手工设计的方法用于提取签名的局部特征、形状特征和边缘方向特征，例如方向梯度直方图（Histogram of Oriented Gradient, HOG）^[28]和尺度不变特征变换（Scale-invariant Feature Transform, SIFT）^[29]。近年来，尽管基于手工设计的特征提取方法取得了一些进展^[30-33]，但这些方法在鉴定阶段性能表现仍然未能达到预期效果。最新的研究证明深度特征提取方法具有丰富的表达能力，特别是卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）^[34, 35]，在手写签名鉴定中取得了显著的进展^[2, 7, 36, 37]，这些方法可以自动地学习和提取特征。另外，随着 Transformer 在计算机视觉任务中被证明拥有强大的学习能力^[8, 21]，有些研究基于 Vision Transformer 进行实验，也取得一些较为可观的结果。

在过去十年间，以卷积神经网络为基础开展了大量的研究工作^[2, 7, 36, 38]。Hafeman