

# 北京理工大学

## 本科生毕业设计（论文）外文翻译

CardioCam: Utilizing Camera on Mobile Devices to Verify Users While Their Heart is

中文翻译题目: CardioCam: 利用移动设备上的摄像头在用户心跳时对其进行验证

## 北京理工大学本科生毕业设计（论文）题目

The Subject of Undergraduate Graduation Project (Thesis) of  
Beijing Institute of Technology

学 院: 计算机学院

专 业: 计算机科学与技术

班 级: 07111906

学生姓名: 钮海洋

学 号: 1120192605

指导教师: 李凡

# CardioCam：利用移动设备上的摄像头在用户心跳时对其进行验证

## 摘 要

随着移动和物联网设备（如智能手机、平板电脑、智能家电）的日益普及，这些设备上存储了大量私人敏感信息。为了防止对这些设备的未经授权访问，现有的用户验证解决方案要么依赖于用户定义的秘密（例如密码）的复杂性，要么求助于专门的生物特征传感器（例如指纹读取器），但用户仍可能遭受各种攻击，如密码盗窃、肩部冲浪、污迹和伪造的生物特征攻击。在本文中，我们提出了 CardioCam，这是一种低成本、通用、难以伪造的用户验证系统，利用了从移动和物联网设备中现成的内置摄像头中提取的独特心脏生物特征。我们证明，通过按下内置摄像头，可以从指尖的心脏运动模式中提取出独特的心脏特征。减轻各种环境照明条件和人类活动的影响。

**关键词：**摄像头、身份验证、移动设备、心脏生物特征。

## 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 摘 要 .....           | I  |
| 第 1 章 介绍 .....      | 1  |
| 第 2 章 相关工作 .....    | 4  |
| 第 3 章 预备知识 .....    | 6  |
| 3.1 心血管系统动力学 .....  | 6  |
| 3.1.1 捕捉心脏运动 .....  | 7  |
| 第 4 章 系统概述 .....    | 8  |
| 4.1 挑战 .....        | 8  |
| 4.2 攻击模型 .....      | 8  |
| 4.3 系统概述 .....      | 8  |
| 第 5 章 摄像机参数优化 ..... | 10 |
| 第 6 章 绩效评价 .....    | 12 |
| 6.1 实验方法论 .....     | 12 |
| 6.2 用户验证性能 .....    | 13 |
| 第 7 章 讨论 .....      | 14 |
| 结 论 .....           | 16 |
| 参考文献 .....          | 17 |

## 第1章 介绍

移动和物联网设备（如智能手机、平板电脑和智能家电）的使用越来越普遍，不可避免地包含私人和敏感信息（如联系人列表、电子邮件、信用卡号和商品订购信息）。未经授权访问此类设备可能会使大量敏感信息面临被滥用的风险。传统的用户验证解决方案主要依赖于密码或图形模式<sup>[1]</sup>，它们会遭受各种攻击，包括密码盗窃、肩部冲浪<sup>[2]</sup>和污迹攻击<sup>[3]</sup>。基于生物识别的用户验证为安全移动设备开辟了一条新途径，尤其是基于指纹的解决方案<sup>[4-5]</sup>，这些解决方案被广泛部署在许多高级智能手机（如 iPhone 和三星手机）中，并为访问移动和智能设备提供了一种更安全的方式。然而，在世界上许多没有专用指纹传感器的发展中地区，50 美元及以下的手机（如 BLU A4）仍有很大的市场<sup>[6]</sup>。此外，由于地理区域分布广泛，缺乏传统的银行和支付基础设施，其中一些低成本市场严重依赖移动支付<sup>[7]</sup>。此外，基于指纹的解决方案容易受到通过受害者照片创建的合成指纹的影响<sup>[8]</sup>。这导致人们重新寻找低成本、通用、难以伪造的安全解决方案，这也有助于使用越来越方便的移动支付系统。现有研究表明，使用附体 PPG/ECG 传感器<sup>[9-12]</sup>或多普勒雷达<sup>[13]</sup>正在寻求通过捕捉人类心脏生物特征来执行用户验证。这些现有的调查通常需要专门的设备（例如传感器或雷达设备），这可能会增加额外的成本并给移动用户带来不便。朝着这个方向，我们提出了 CardioCam，它不需要专门的设备来提取独特的心脏生物特征来进行用户验证。CardioCam 使用内置摄像头，几乎所有类型的移动设备都可以使用，包括一些研究人员已经表明，智能手机上的内置摄像头可以用来测量心率和脉搏容积<sup>[14]</sup>。现有工作<sup>[15]</sup>还证明了智能手机摄像头捕捉的心脏信号的正确性和适用性，这些信号与专业医疗仪器（即脉搏血氧计）测量的信号非常接近<sup>[15]</sup>。然而，摄像头是否能够提取独特的心脏生物特征用于用户验证仍然是一个悬而未决的问题。CardioCam 进一步探索了内置摄像头的局限性，旨在利用摄像头提取的独特心脏生物特征实现用户验证。该系统只需用户将指尖按在相机表面即可提取心脏特征，如图 1-1 所示。因此，它可以直接应用于几乎所有的移动设备，以执行用户验证，包括解锁设备和授权特定权限。例如，FridgeCam 允许用户将一个小摄像头贴在冰箱内部，用于储存食物监控。亚马逊的虚拟助理 Echo Look 也配备了摄像头，以支持其不断增长的命令集（例如，询问对哪套衣服最好看的意见）。此外，如今，配备低成本摄像头的小型物联网

设备，如视频门铃，正在为许多家庭安全系统提供服务，亚马逊 Dash Button 可以轻松地与低成本摄像头集成，以实现用户验证，从而保护隐私。因此，在物联网设备上大规模部署摄像头为 CardioCam 验证用户的各种应用提供了巨大的机会，例如入口的访问控制、通过带家长控制的冰箱点餐以及通过虚拟助理购买衣服，而不透露个人生活方式。

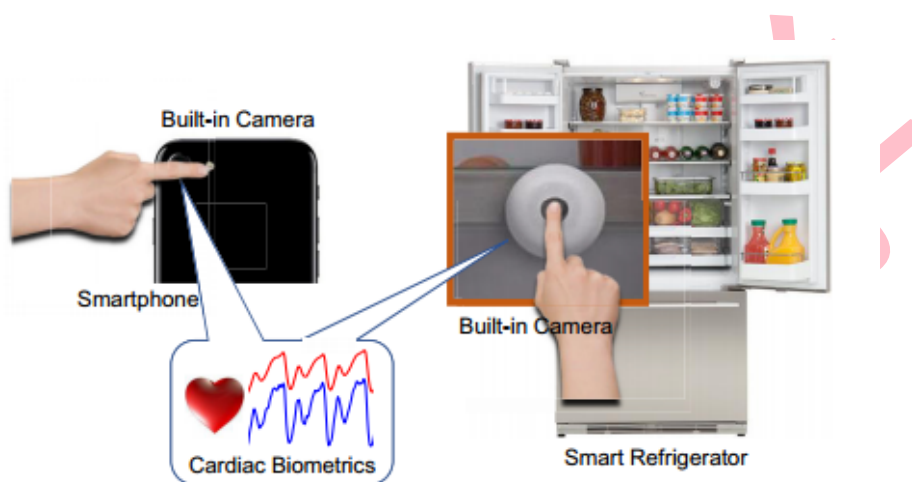


图 1-1 使用设备内置摄像头实现基于心脏模式的用户验证

**传统解决方案。**移动设备上的内置摄像头已被用于使用生物特征进行用户验证，包括虹膜图案、面部特征和掌纹。这些解决方案主要依赖于基于计算机视觉的方法，通常会受到伪造生物特征的欺骗攻击。例如，基于虹膜的用户验证系统可能会被与合法用户具有相同虹膜纹理的合成虹膜图像欺骗。iPhone X 上的 Face ID 可以捕捉用户面部的几何形状和深度，以验证用户的身份。尽管已被证明比基于指纹的身份验证（如 Touch ID）更安全，但该技术需要高端且昂贵的摄像头（如 TrueDepth 前置摄像头）。此外，这些基于视觉的解决方案可能会导致相机拍摄的视觉内容中嵌入的丰富信息引起的隐私问题，并且它们的性能可能会因周围的照明条件而降低。

**使用内置摄像头进行基于心脏模式的用户验证。**在本文中，我们探索从内置摄像头中提取心脏生物特征。已经证明，在大量人群中，心脏特征是内在的、独特的和非意志的<sup>[16-17]</sup>。在这项工作中，我们没有使用 PPG/ECG 传感器，而是通过按下内置相机，搜索从指尖的心脏运动模式中提取的独特心脏特征。我们希望从指尖提取的心脏特征在不同的个体之间是可区分的，并可以作为有效用户验证的候选者。心脏

特征通常在实际场景下受到影响：提取的心脏运动模式受到照明条件的影响；心跳随着动作和人类情绪的变化而变化；指尖按压位置和压力在心脏生物特征提取中也起着关键作用。为了解决上述挑战，CardioCam 自适应地更新相机配置，并动态导出心脏。

为了便于生物特征提取，CardioCam 将心脏测量分为不同的心动周期，并对每个心动周期的持续时间/振幅进行归一化，以减轻心率/强度变化的影响。归一化过程将增强导出的心脏生物特征的鲁棒性，同时保留心脏运动模式中嵌入的形态学特征。我们通过形态学特征分析进一步提取每个心动周期内用户特定的心跳特征。为了有效抑制小规模的心脏运动变化，开发了一种基于主成分分析（PCA）的特征变换方案。这些特性抽象用于在系统注册期间构建合法的用户配置文件。在验证阶段，CardioCam 检查新观察结果和用户配置文件之间的特征抽象的欧几里得距离，以验证合法用户或拒绝对手。我们工作的主要贡献总结如下：

- 据我们所知，CardioCam 是第一个低成本的通用用户验证系统，它使用从移动设备或物联网设备上的内置摄像头中提取的心脏生物特征。
- 我们证明，当从指尖提取心脏特征时，可以保留固有的、独特的和非意志的心脏特性；当用户按下指尖时，内置摄像头上的反射光可以很好地捕捉到心脏生物特征。
- 我们开发了一种基于梯度的优化技术，该技术使相机的配置适应环境光的变化和人类运动的变化，并从一组动态选择的图像像素中获得高质量的心脏测量值。给定对心脏运动敏感的选定像素，可以抑制指尖位置和压力对相机的影响。
- 通过所提出的心脏生物特征提取和基于 PCA 的特征转换方案，我们证明了 CardioCam 可以稳健地验证用户，并对建模的攻击具有弹性，在这种攻击中，对手将自己的指尖压在相机上，希望通过系统。
- 我们在各种数据收集策略和系统设置下对 25 名受试者进行了广泛的实验。结果表明，CardioCam 可以实现 99% 以上的平均真阳性率（TPR）来验证用户，同时保持低于 4% 的假阳性率（FPR）来很好地拒绝对手。



## 第2章 相关工作

传统的用户验证机制依赖于密码或图形屏幕模式<sup>[1]</sup>，这需要用户记住复杂的文本/图形秘密，以验证他们的身份。由于这些解决方案只验证秘密本身，而不是用户，因此它们通常容易受到各种攻击，如肩部冲浪<sup>[2]</sup>和污迹攻击<sup>[3]</sup>。

作为一种替代方案，许多研究人员采用生理生物特征来进行用户验证。特别是，基于指纹的解决方案已成为 iPhone 和三星 Galaxy S 系列等许多高端智能手机的基本规范。然而，指纹读取器在大多数中低端移动设备中仍然不可用，基于指纹的系统也容易受到使用合成伪像的欺骗攻击。除了指纹之外，其他人类生物特征（例如虹膜、人脸和掌纹）也被用来在摄像头的帮助下实现用户验证，尤其是移动设备上的内置摄像头，它已经被用于设备认证。然而，由于相机捕获的图像/视频中嵌入了丰富的信息，这种基于视觉的解决方案的隐私问题阻碍了它们的广泛使用。例如，周围的背景场景可以公开用户的位置、生活环境或任何个人物品。此外，上述基于视觉的解决方案中捕获的生物特征（如虹膜、人脸、掌纹）都是人类的外部特征，可以被对手伪造以发动欺骗攻击。

为了克服上述弱点，一些研究依赖于从心电图（ECG）和光体积描记术（PPG）信号中得出的内在心脏生物特征（例如，心跳模式）。然而，这些方法需要用户将专用传感器连接到他们的胸部或指尖，这使得它们很难应用于移动用户。心脏扫描<sup>[13]</sup>最近提出了一种利用多普勒雷达提取不同心脏运动模式的非侵入性方法，用于用户身份验证，但专用设备的参与也增加了额外的成本，给移动用户带来了不便。

对移动用户的不便。

为了消除涉及专业设备的限制，一些研究探索利用商业现成设备上现成的传感器来捕捉心脏生物特征。具体而言，Matsumura 等人<sup>[14]</sup>证明，当用户将指尖放在内置相机上时，可以测量心率和脉搏容积。此外，Seism 提出利用智能手机加速度计和内置摄像头推导脉冲传输时间（PTT）。一些研究人员进一步利用内置摄像头来估计血氧水平 PhO2 和血红蛋白水平。朝着这个方向，本文进一步探索了使用内置摄像头提取非自愿且难以伪造的心脏生物特征来进行用户验证的可行性。与现有的生物识别认证（如指纹、人脸识别）相比，CardioCam 具有更好的可扩展性，因为它只需要内置摄像头和手电筒，几乎所有类型的移动设备都可以使用。此外，我们的系统是一

个轻量级的用户验证系统，具有极低的计算复杂度和内存/能量开销。

北京理工大学



## 第3章 预备知识

### 3.1 心血管系统动力学

心脏通过交替的心肌收缩和舒张将血液泵入血管，形成一种周期性的心跳模式，称为心动周期，而血管携带血液在包括指尖在内的全身循环。如图 3-1 (a) 所示，人类心脏包含四个腔室（即左上心房和右心房；以及左下心室和右下心室），典型的心动周期通常包括四个主要阶段：心房收缩、等容收缩、心室射血和等容舒张。在心房收缩阶段，心室收缩，而心房放松并采集血液。然后是体积收缩，心室收缩，所有心室的血容量都没有相应的变化。当心室开始喷出血液（即心室喷出）时，心房收缩，将血液泵送到心室。最后，一个称为等容舒张的短时间间隔开始，心房瓣膜开始闭合直到另一个心动周期开始。由于心血管系统存在生理差异（如心脏大小、形状和组织等），不同的人心肌收缩和舒张的幅度不同。因此，血管中的血流在不同个体的心动周期内遵循独特的变化趋势。ECG 和 PPG 信号都有能力揭示嵌入心动周期四个阶段的独特心脏生物特征，现有工作<sup>[17]</sup>已经证明了这种心脏生物特征在大量人群中的独特性。与基于 PPG 的方法类似，CardioCam 通过用外部光源（即手电筒）照射指尖来测量血流变化方面的心脏运动模式，从而可以捕获等效的独特生物特征。此外，通过指尖静脉的血流会产生独特的心脏运动模式。这种模式可以揭示指尖血管的扩张性，并反映独特的静脉特征（如静脉分布），这已在大量人群中得到证明。

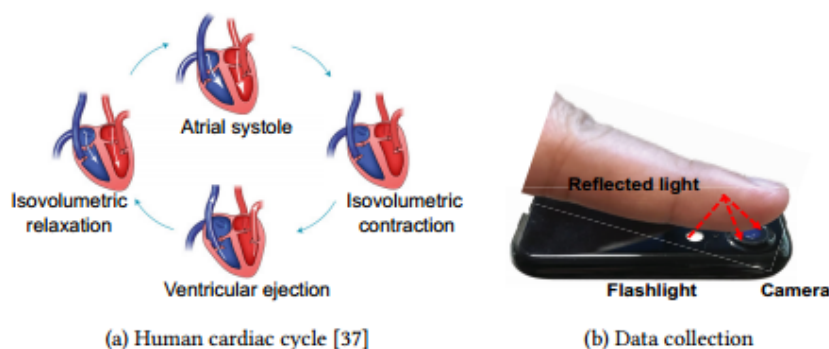


图 3-1 心动周期的四个阶段以及利用相机和手电筒进行的数据收集。

因此，我们受到启发，从心脏运动模式中提取有效的生物特征，以进行用户验

证。

### 3.1.1 捕捉心脏运动

考虑到心脏运动模式的内在、独特和非意志特性，下一步是如何有效地提取生物特征。与现有的依靠专门仪器捕捉心脏运动的工作不同，我们试图通过商用现成设备通过指尖检查反映独特心脏运动的血流。如图 3-1 (b) 所示，通过用智能手机上的手电筒照射指尖皮肤，内置摄像头可以连续观察血流变化引起的光吸收变化，其中嵌入了独特的心脏特征。

具体来说，内置相机的每个像素都充当一个独立的光传感器，以检测指尖上的光变化。由于当前智能手机摄像头的高分辨率（例如，每帧  $1280 \times 720$  像素），可以实现细粒度的心动周期监测。此外，每个像素的三个颜色通道（即红色、蓝色和绿色）为有效的特征提取提供了多个维度。相比之下，传统的心脏监测仪，如光电心电图（PPG）传感器，只能支持多达 3 种不同的光电二极管（即红色、绿色、红外光电二极管），相当于三个像素，用于心脏动态检测。

图 3-2 显示了两个不同用户在三个心动周期内两个不同颜色通道（即红色和绿色）的光强变化。我们对每个心动周期的时间尺度进行了归一化，以消除心率波动的影响。很明显，两位用户在两种颜色通道中都表现出不同的心脏运动模式，这证实了智能手机摄像头可以捕捉到独特的心脏特征。此外，由于人类皮肤对不同颜色的光具有不同的吸收/反射率，由红色和绿色通道揭示的心脏运动模式具有轻微的差异，这反而为可靠的心脏特征提取提供了一些冗余。

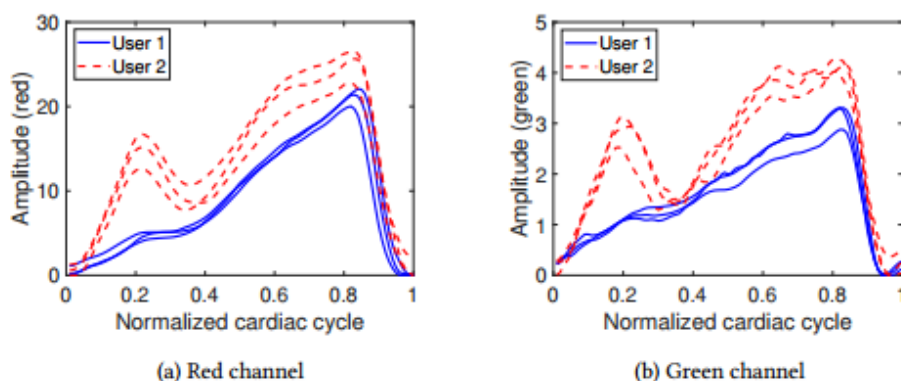


图 3-2 从相机的红色和绿色通道中提取的两个用户的心动周期

## 第4章 系统概述

### 4.1 挑战

为了利用移动和智能设备上无处不在的内置摄像头，利用独特的心脏生物识别技术实现有效的用户验证，需要解决许多挑战。

**可靠的心脏测量。**用户验证的成功建立在对心脏运动模式的可靠测量之上。然而，在实际情况下，各种影响因素，如环境照明条件、指尖按压位置和人体运动，都会影响导出的心脏测量的可靠性。因此，在所提出的系统的心脏测量中减轻这些影响是至关重要的。

**心脏特征的独特性。**由于心脏运动模式是通过用内置相机捕捉指尖的血流变化间接获得的，因此将记录的视频帧转换为与独特心脏运动模式相关联的可靠心脏生物特征是一项具有挑战性的任务。此外，为了促进有效的用户验证，从原始心脏测量中提取和验证代表性的生物特征是很重要的。

**系统鲁棒性。**心脏测量也受到许多随机因素的影响，如情绪变化、心率和呼吸频率的变化。该系统应该能够消除这种随机性，并得出稳健的生物特征抽象。有必要开发一种能够抑制小规模心脏运动变化的变换算法。

### 4.2 攻击模型

我们考虑的攻击场景是，对手试图访问合法用户无人看管的私人移动设备上的敏感信息或功能（如时间表、照片和移动支付）。对手对合法用户的心脏生物特征没有任何先验知识。为了欺骗设备，对手试图通过将指尖按在内置摄像头上，利用对手自己的心脏生物特征通过用户验证过程。此外，对手还可以移动其指尖相对于相机的位置或调整手指压力，旨在产生与合法用户相似的心脏生物特征。

### 4.3 系统概述

CardioCam 的基本理念是借助手机上无处不在的内置摄像头/手电筒，利用内在、独特和非自愿的心脏生物特征来验证用户的身份设备。当用户试图访问敏感信息/功能（例如，移动支付、照片）或通过向上滑动设备的触摸屏或按下开关按钮解锁其移动设备时，可以触发 CardioCam。考虑到视频录制和配置文件匹配的时间，CardioCam

完成一次性用户验证大约需要 2.5 秒。当检测到相机被指尖覆盖时，数据采集将在内置相机和手电筒打开的情况下初始化。在手电筒的照射下，与心脏运动模式相关的指尖血流将被内置相机以视频帧的形式捕捉到。在推导心脏运动之前，我们首先开发了一种基于梯度的优化技术，以调整相机配置（即闪光灯强度，ISO），以补充环境光的变化。接下来，通过模块“动态心波提取”从捕获的视频帧中导出可靠的心脏运动模式。由于指尖的按压位置和压力在验证过程中可能会保持轻微变化，我们建议动态像素选择仅包括对心脏运动最敏感的像素子集，以提高心脏测量的信噪比。特别地，在每个单独的心动周期内确定敏感像素，该心动周期通过搜索心脏测量中的后续局部最小值来分割。然后，所选像素的视频流将被转换为关于红色、绿色和蓝色通道的三个心波，随后分别进行带通滤波器和归一化处理，以减轻由人类呼吸和心率变化引起的影响。

## 第 5 章 摄像机参数优化

我们的初步研究发现，只有在适当的摄像机配置下才能获得可靠的心脏运动模式有足够数量的光进入相机。极低或极高的闪光灯照明会降低从相机捕捉心脏运动模式时的像素灵敏度。由于各种环境照明条件，CardioCamera 需要调整相机配置，以补充环境光源（如太阳、人造光）引入的光线。因此，我们在相机/手电筒配置上设计了一个基于梯度的优化方案，以减轻环境光的影响。

如图 5-1 (b) 所示，无论是高或低相机 ISO/闪光灯照明，在检测心脏运动模式时都无法达到令人满意的帧质量。特别地，当 ISO 分别为 300、400 和 500 时，在 0.2、0.2 和 0.3 的闪光灯强度下可以发现最大评估分数。这一观察结果促使我们寻找最佳的相机和闪光灯配置（即 ISO 和闪光灯强度），以最大限度地提高像素灵敏度（即评估分数  $S$ ）。具体来说，我们开发了一种迭代搜索方法，其中下一次配置调整是基于当前配置的反馈。每次迭代的闪光灯/ISO 偏移量计算如下：

$$a_{n+1} = a_n + \gamma \nabla S(a_n) \quad (5-1)$$

其中  $a_n$  表示第  $n$  个心动周期的闪光灯强度或相机 ISO 配置，并且相应的评估分数

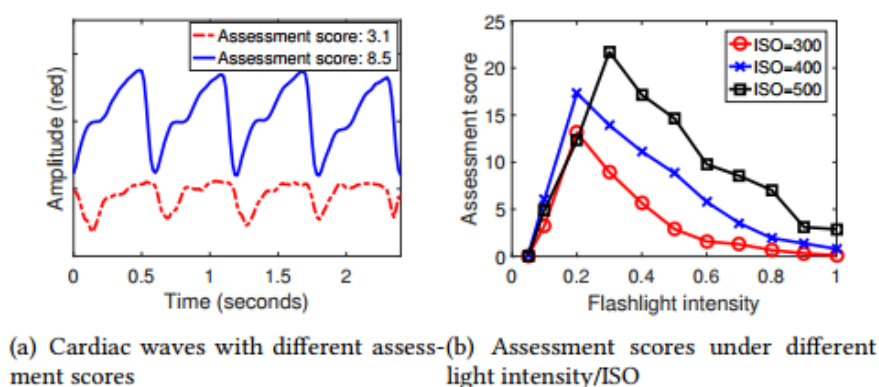


图 5-1 各种条件下心电波的评估分数  $S$  的图解

表示为  $S(a_n)$ 。在每个心动周期，都会按照梯度上升方向更新  $\nabla S(a_n)$ ，具有固定的步长值（即， $\gamma_{FL}=0.05$  和  $\gamma_{ISO}=5$ ），直到达到令人满意的像素灵敏度（即，超过经



验阈值)。算法 1 对优化过程进行了总结。

图 5-2 显示了当周围环境分别处于两种不同的环境光照条件下（即，昏暗和明亮的环境光）时，用户导出的心搏波的示例。随着 CardioCamera 自适应地调整相机闪光灯和 ISO 配置，以补充环境光的变化，我们观察到在两种不同的照明环境下收集的心搏波表现出相似的形态特征。结果表明，所提出的摄像机参数优化是一种很有前途和可靠的方法，可以确保高质量的心脏运动模式推导。

---

**Algorithm 1** 视频生物识别优化

---

```

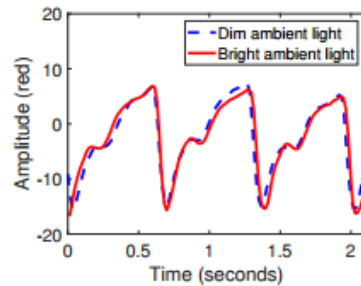
1: function CameraAdjustment
2:    $ISO = 550, S_{prev} = 0, FL_{prev} = 0$ 
3:   while  $S < Threshold$  do
4:      $S_{prev} = S$ 
5:      $S = Score(Frame_{peak}, Frame_{valley})$ 
6:      $Feedback = (S - S_{prev})$ 
7:     if  $FL - FL_{prev} > \tau$  then
8:        $FL_{prev} = FL$ 
9:        $Offset_{fl} = Feedback * \gamma_{FL}$ 
10:       $FL = FL + Offset_{fl}$ 
11:       $Camera.ISO = ISO$ 
12:     else
13:        $Offset_{iso} = Feedback * \gamma_{iso}$ 
14:        $ISO = ISO + Offset_{iso}$ 
15:        $Camera.ISO = ISO$ 
16:     end if
17:   end while
18: end function

```

---



(a) Experimental setup



(b) Cardiac waves

图 5-2 分别在昏暗和明亮的环境光条件下得出的心搏波的比较



## 第 6 章 绩效评价

### 6.1 实验方法论

**设备。**我们在 iPhone 7 上使用 AVFoundation 框架实现了 CardioCam，该框架提供了各种图像处理和相机配置功能。iPhone 7 配备了 1200 万像素的内置高清后置摄像头，可实现 60fps 的视频帧速率和 720p/1080p 的分辨率。尽管 iPhone 7 支持 120fps/240fps 的慢动作视频录制，但我们选择了 60fps 的帧速率，这在大多数移动设备上都可以使用，尤其是中低端智能手机。此外，我们还通过调用内置的 AVCaptureDevice.Format 类来以编程方式进一步调整帧速率（即 30/40/50/60fps）和视频分辨率（即 240/360/480/720p），以测试我们系统的通用性，如第 9.5 节所述。请注意，CardioCam 只调整闪光灯强度和相机 ISO，以更好地捕捉心脏运动模式，而其他相机参数，如焦距、快门速度和白平衡，都被锁定在所提出的系统中。

**心脏数据采集。**心脏数据集收集自 25 至 33 岁的 25 名参与者（19 名男性和 6 名女性）。特别是，我们构建了一个主数据集，其中包含每个参与者的三条轨迹，每条轨迹持续 60 秒，包括大约 60-75 个心动周期。我们总共从 25 名参与者中收集了 5583 个心动周期样本。在数据收集过程中，参与者的姿势（如站着或坐着）和周围环境（如室内或室外）没有限制。此外，我们进一步构建了四个独立的数据集，涉及 8 名参与者，以研究生物特征变化、不同手指、不同指尖按压位置和情绪状态变化的影响。我们将在第 9.4 节中详细说明数据收集的细节。

**验证策略。**为了测试我们系统的性能，我们交替地将每个参与者设置为合法用户，其余 24 个参与者充当攻击者。在用户注册过程中，每个合法用户的前 70 个预先收集的心动周期用于 PCA 系数推导和轮廓构建，其余心动周期用于系统验证。

**评估指标。**为了评估我们的系统性能，我们定义了五个不同的指标：真阳性率（TPR）和假阳性率（FPR）；平衡精度（BAC）；受试者工作特性曲线；ROC 曲线下面积（AUC）。特别是，TPR 是被正确验证为合法用户的用户的百分比，FPR 是被错误识别为合法用户攻击者的百分比。BAC 是 TPR 和真阴性率（TNR）的等权重组合，即  $TNR=1-FPR$ 。ROC 曲线是通过在各种阈值设置（即  $\eta$  从 0 到 400）下绘制 TPR 与 FPR 来创建的。AUC 是一种度量验证模型能够在多大程度上区分合法样本和欺骗样本。注意，AUC 通常在 0.5（随机猜测）和 1（完美验证）之间。

## 6.2 用户验证性能

图 6-1 描述了在每次验证中利用不同数量的心动周期（即 1、3 和 5）验证 25 名参与者的平均 ROC 曲线。具体而言，对于 1 个周期、3 个周期和 5 个周期的验证，每个 ROC 曲线的 AUC 分别计算为 0.958、0.974 和 0.987。很容易发现，5 个心动周期的表现最好。结果证明了 CardioCam 在用户验证方面的有效性，即使每个用户只有 3 个心动周期。此外，在图 6-2 中，我们还展示了验证所有 25 名参与者的 BAC。我们可以发现，CardioCam 在 1 个周期、3 个周期和 5 个周期的平均 BAC 分别达到 95.5%、97.9% 和 98.6%，相应的标准偏差（STD）分别为 3.8%、2.7% 和 2.2%。上述结果证实，CardioCam 在验证所有合法用户的同时拒绝对手是高度可靠的。

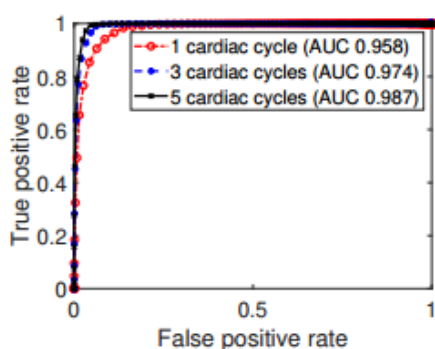


图 6-1 CardioCam 利用来自 25 个用户的心动周期的性能

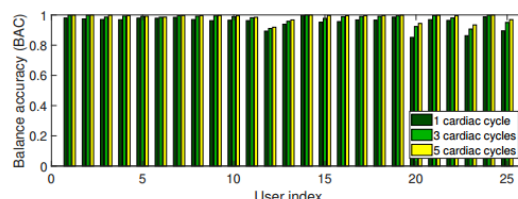


图 6-2 CardioCam 在验证单个用户分别利用 1 个周期、3 个周期和 5 个周期时的性能

## 第 7 章 讨论

**部署可行性。** CardioCam 具有最低的硬件要求（即摄像头和手电筒），以便于利用心脏生物特征进行用户验证。具体来说，相机和手电筒在大多数移动设备和物联网设备中都很容易获得，因此不会给移动用户带来额外的成本和不便。此外，如第 9 节所示即使在低帧速率（即 30fps）和低相机分辨率（即 240p）下，CardioCam 系统仍然可以实现 0.953 和 0.98 的高验证精度。因此，我们相信 CardioCam 可以应用于各种需要可靠用户验证的移动和物联网设备。

**内存和能量消耗。** 我们的系统是一个轻量级的用户验证系统，具有较低的计算复杂度和内存/能量开销。CardioCam 中内存和功耗最高的任务是数据采集，它通过内置摄像头捕捉用户的心脏模式。录制的视频持续 2 秒，仅占用 0.2MB 的内存，相应的功耗低至 4.6J。考虑到捕获的心脏模式，CardioCam 只需约 0.5 秒即可完成一次性用户验证，因为它的设计复杂度低，大多数移动和物联网设备都能负担得起，不会带来太多开销。

**身份验证延迟。** 与指纹和人脸识别等其他用户验证方案相比，CardioCam 通常需要更长的时间来完成验证过程（即，根据个人心率，至少需要 2.5 秒）。我们进一步发现，很大一部分时间成本用于优化摄像头配置，而不是心脏体征采集。为了降低时间成本，我们将深入研究像素灵敏度与环境光强度之间的关系，以便在心脏体征采集之前完成优化过程。

**准确性改进和进一步评估。** 虽然目前尚不清楚我们系统中的心脏特征在大量用户中是否足够独特，但我们的结果显示出了希望，至少作为与其他现有技术（如指纹和人脸识别）结合使用的额外信号。

在我们未来的工作中，我们的目标是使用具有不同相机闪光灯设置的各种设备来评估系统的可扩展性，以及更严重的攻击（例如，攻击者可以再现心脏收缩功能）。我们将尝试通过探索移动/物联网硬件的进步来提高验证准确性，例如新兴的多摄像头和视频帧速率（例如 120-240fps）的改进，以及在不同人群中更具歧视性的基准/非基准特征。此外，我们使用具有各种缩小分辨率的视频帧来评估相机分辨率的影响。结果表明，CardioCam 能够抑制帧分辨率的影响，因为 **用欺骗攻击进行 Copping**。最极端的情况是，对手获取合法用户的心搏波（例如，通过脉搏血氧计），并试图通过用半导体光源（例如，红色发光二极管）再生心脏运动模式来欺骗 CardioCam。为了应对这种攻击，我们可以进一步探索不同颜色通道（如绿色和蓝色）的心脏运动模

式，这些通道很难用单色光源伪造。我们将把对此类对抗性案件的详细研究作为我们未来工作的一个途径 **心脏病下的稳健性**。目前，我们的工作主要集中在验证健康人的身份，没有心律失常和先天性心力衰竭等心脏病的患者。但心脏异常可能会对心脏运动模式产生相当大的影响，从而影响心脏生物特征的稳定性。未来，我们计划将 CardioCam 应用于心血管疾病患者，并开发更通用的用户验证机制。

## 结 论

在本文中，我们提出了 CardioCam，这是第一个低成本、通用且难以伪造的基于心脏生物特征的用户验证系统。与现有的用户验证系统不同，CardioCam 利用移动设备和物联网设备中现成的内置摄像头，提取独特的心脏生物特征来验证用户的身份。为了实现高度可靠的心脏运动推导，我们设计了一种基于梯度的相机配置优化技术，以及动态像素选择，以减轻不断变化的环境光和指尖触摸压力/位置的影响。为了实现高度可靠的心脏运动推导，我们设计了一种基于梯度的相机配置优化技术，以及动态像素选择，以减轻不断变化的环境光和指尖触摸压力/位置的影响。为了便于准确的用户验证，CardioCam 考虑了两种类型的生物特征，形态特征和非基准特征。通过涉及 25 名受试者的大量实验，实现了一个原型系统来评估 CardioCam 的性能。结果表明，在各种摄像头设置和数据采集模式下，CardioCam 可以在验证合法用户的同时拒绝未经授权的用户，从而实现显著的准确性和稳健性。

## 参考文献

- [1] Wiedenbeck S, Waters J, Birget J C, et al. Authentication using graphical passwords: Effects of tolerance and image choice[C]//Proceedings of the 1st Symposium on Usable Privacy and Security, SOUPS 2005, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, July 6-8, 2005. 2005.
- [2] Wu T S, Lee M L, Lin H Y, et al. Shoulder-surfing-proof graphical password authentication scheme [J]. International Journal of Information Security, 2014, 13(3): 245-254.
- [3] M. E. Smudge attacks on smartphone touch screens[C]//Usenix Conference on Offensive Technologies. 2010.
- [4] Arakala A, Jeffers J, Horadam K J. Fuzzy Extractors for Minutiae-Based Fingerprint Authentication [C]//Advances in Biometrics, International Conference, ICB 2007, Seoul, Korea, August 27-29, 2007, Proceedings. 2007.
- [5] Maltoni D, Maio D, Jain A K, et al. Fingerprint Sensing[J]., 2022.
- [6] Santosham S, Lindsey D. Connected women 2015 - bridging the gender gap: mobile access and usage in low and middle income countries[J].,
- [7] Kumar A. CREATING RICH EXPERIENCES IN MAIL THROUGH ATTACHMENTS[Z]. 2012.
- [8] Aditi, Roy, Nasir, et al. MasterPrint: Exploring the Vulnerability of Partial Fingerprint-Based Authentication Systems[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017.
- [9] Arteaga-Falconi J S, Osman H A, Saddik A E. ECG Authentication for Mobile Devices[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(3): 591-600.
- [10] Bonissi A, Labati R D, Perico L, et al. A preliminary study on continuous authentication methods for photoplethysmographic biometrics[C]//2013 IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications. 2013.
- [11] Re?It Kavsao?Lu A, Polat K, Recep Bozkurt M. A novel feature ranking algorithm for biometric recognition with PPG signals[J]. Computers in Biology and Medicine, 2014, 49: 1-14.
- [12] Safie S I, Soraghan J J, Petropoulakis L. Electrocardiogram (ECG) Biometric Authentication Using Pulse Active Ratio (PAR)[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2011, 6(4): 1315-1322.
- [13] Feng L, Chen S, Yan Z, et al. Cardiac Scan: A Non-contact and Continuous Heart-based User Authentication System[C]//the 23rd Annual International Conference. 2017.
- [14] Matsumura K, Yamakoshi T. iPhysioMeter: A new approach for measuring heart rate and normalized pulse volume using only a smartphone[J]. Behavior Research Methods, 2013, 45(4): 1272-1278.
- [15] Kurylyak Y, Lamonaca F, Grimaldi D. Smartphone-Based Photoplethysmogram Measurement[M]. Digital Image, Signal, 2012.
- [16] Miyuki, Kono, Hironori, et al. Near-infrared finger vein patterns for personal identification.[J]. Applied optics, 2002.
- [17] Miura N, Nagasaka A, Miyatake T. Feature extraction of finger-vein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification[J]. Systems & Computers in Japan, 2004, 35(7): 61-71.