OAcode：屏幕上的整体美学二维条码

Zehua Ma、Xi Yang、Han Fang、Weiming Zhang 和 Nenghai Yu

arXiv:2302.02396v1 [cs.MM] 5 Feb 2023

摘要——**如今，二维条码已广泛应用于各个领域。为使二维条码更好地融入市场营销材料，提升其视觉质量和可读性，人们提出了一系列美学二维条码方案。然而，我们认为现有的美学二维条码方案仅具备**部分美感，**因为它们只美化了数据区域，却保留了传统二维条码方案中黑白外观的位置检测图案。因此，本文提出首个**整体美学二维条码方案，**称为 OAcode，该方案取消了位置检测图案。其检测过程基于预先设计的 OAcode 对称数据区域，可利用该区域的对称性作为校准信号，在条码扫描过程中恢复透视变换。此外，我们还提出了一种增强型解调方法，以抵御相机拍摄过程中常见的镜头畸变。实验结果表明，当以** 720×1280 **像素的分辨率拍摄** $5\times5cm$ **OAcode，屏幕与摄像头距离为** $10cm$ **且角度不超过**25°**时，OAcode 的**检测率为 100%，解调准确率为 99.5% 。**对于** $10\times10cm$ **OAcode，消费级手机可在距离**$90cm$ **处将其提取，准确率约为**90%。

索引词——**美学二维条码、透视畸变、镜头畸变、自卷积函数**



(a) 一些美学二维条码。 (b) OAcode。

图 1. 嵌入美学二维条码的商业海报示例。从左上至右下，(a) 中依次嵌入了二维码图像 [9],PiCode [10], RA Code [11], 和 RU code [12]。美化后的数据区域使商业海报的语义得以保留，但位置检测图案的黑白外观以及白色静区造成了海报视觉上的不连贯。(b) 在相应位置嵌入了四个 OAcode，整体视觉效果更佳。

I. 引言

WITH 随着智能移动设备和无线网络基础设施日益普及， [1], 二维条码已广泛应用于各行各业，从制造业和物流到移动营销和商业。尤其是在移动营销领域，二维条码发挥着重要作用，因为 2008 [2], [3]。根据 2012 [4], 的一项研究统计，印刷媒体（即杂志、传单和报纸）是最常用于展示二维条码的媒介，占比超过80%。然而，在2022 [5], 超过39%的二维条码是通过屏幕扫描的，包括电视和个人电脑上的网站。人们越来越倾向于扫描屏幕上的二维条码，因为一方面屏幕内容呈爆炸式增长， [6], 另一方面，COVID-19疫情期间对身体接触的限制以及无纸化办公的推行，使印刷媒体的数量迅速减少 [7], [8]。此外，作为移动营销媒介，屏幕相比印刷媒体具有一些优势，例如色彩准确度更高，也更易于维护。通过将二维条码附加到营销相关材料上并展示在各种屏幕上，潜在客户只需用智能移动设备扫描这些二维条码，便能轻松获取相关产品信息。

然而，传统条码（如快速响应（QR）码 [13] 和 Data Matrix [14],）在移动营销中存在一些缺点。它们最初被设计成二进制外观，以便于机器快速传输数据，却缺少能让人读懂的提示。人们在扫描传统二维条码之前，无法知道其中关联了什么信息，这可能会降低潜在消费者的兴趣。此外，它们黑白的外观难以满足人们对视觉质量不断增长的需求 [15]–[17],，尤其是在屏幕上的移动营销中 [6], [18]–[20]。因此，很难将它们融入色彩丰富、设计精良的移动营销材料中。

为了解决这些问题，人们提出了多种美学二维条码方案，包括半色调二维条码[21], [22], 、图像组合二维条码 [23], 以及图像嵌入式 [9]–[12], [24]–[29],，其中图像嵌入式二维条码被认为是最有前景的技术 [27]。它通常会在数据区域嵌入与数据相关的图像，以生成美学二维条码，使其更易于人们理解、更具吸引力，并能更好地融入营销材料。如图 1 (a) 所示，这些美学二维条码不会遮挡商业海报的主要内容。然而可以发现，这些现有方案仍保留了醒目的位置检测图案。因为在大多数二维条码检测方案中，即使是一些最先进的方案 [30]–[32],，位置检测图案

Zehua Ma、Xi Yang、Weiming Zhang 和 Nenghai Yu 任职于中国科学技术大学电磁空间信息重点实验室，地址：中国合肥，邮编 230026。Han Fang 任职于新加坡国立大学计算机学院，地址：新加坡 117417。通讯作者：Weiming Zhang。（电子邮箱：mzh045@mail.ustc.edu.cn, zhangwm@ustc.edu.cn）本研究部分得到了国家自然科学基金（项目编号 62072421、62102386、62002334、62121002 和 U20B2047）以及中国科学技术大学学生创新创业基金（项目编号 XY2022X01CY）的资助。

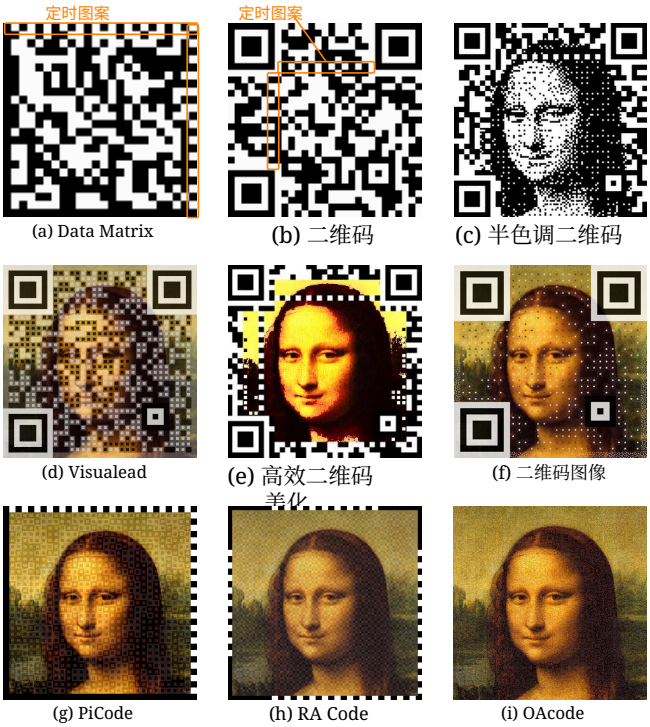


图 2. 二维条码方案示例。从左上方到右下方，所示二维条码逐渐接近目标图像。除所提出的 OAcode 外，所有二维条码都具有醒目的位置检测图案和定时图案。

也是必不可少的。这种设计导致嵌入美学二维条码前后营销材料的结构相似度较低，而结构相似度是图像质量评估中最常用的质量指标之一 [15]–[17]。此外，如图 2 (a)、(b) 和图 1 (a) 所示，为确保位置检测图案保持预先设计的外观，需要在其周围设置白色静区[33]。位置检测图案和静区在美学二维条码与精心设计的海报之间形成了明显的边界，损害了海报设计的美感。因此，我们认为这些现有的美学二维条码在一定程度上只是美观。

因此，本文提出了一种整体美学二维条码，称为 OAcode。该方案消除了位置检测图案对视觉效果的影响，同时美化了数据区域。如图 1(b) 所示，与现有美学条码相比，嵌入 OAcode 的海报能更好地保留原始设计。

然而，位置检测图案在二维条码检测过程中发挥着重要作用，具有以下功能：

重新同步 在传统的二维条码检测过程中，可根据位置检测图案检测出二维条码的四个角点，随后利用这些角点确定参数，以还原透视变换。此外，位置检测图案通常设计为旋转不变，以确定二维条码的旋转状态。结合这两种方式，可将扫描到的二维条码重新同步至未旋转的正方形状态。

参数确定 为满足不同场景下的容量需求，二维条码方案通常提供多个容量版本供选择，因此提取程序需要能够确定扫描到的二维条码所属的版本。在现有的传统和美学二维条码方案中，版本参数通过定时图案传递；如图 2 (a) 和 (b) 所示，定时图案是位置检测图案的一部分。除了容量版本，提取程序还需要知道模块[1]尺寸，这也可通过定时图案获取。

镜头畸变校正 拍摄过程引入的镜头畸变会导致线到曲线的映射 [34],, 从而降低二维条码的解调准确率，尤其是在其大容量版本 [10] 中。现有的二维条码方案通常利用定时图案来抵抗镜头畸变。

设计 OAcode 的难点在于，作为一种美学二维条码方案，它必须在不使用位置检测图案的情况下，实现上述必要功能。OAcode 的新颖之处，即本文的主要贡献，总结如下。

1) OAcode 移除了位置检测图案，因此具有更好的视觉质量。通过精心设计 OAcode 的对称数据区域，便可移除位置检测图案；在后续检测过程中，该数据区域的对称性用作同步信号。在 OAcode 生成过程中，我们还提出了一种采用自适应强度的快速混合方法，该方法的作用类似于误差扩散抖动，并可避免背景图像内容导致的强度裁剪。

2) 我们基于 OAcode 的数据区域对称性和霍夫变换，精心设计了一种 OAcode 检测策略。该策略能够实现原本需要通过可见位置检测图案实现的所有功能，包括二维条码同步、旋转状态判定、模块尺寸判定和信息容量判定。

3）我们提出了一种 OAcode 增强解调方法，以便在镜头畸变的情况下获得更高的解调准确率；镜头畸变在相机拍摄过程中普遍存在 [34]–[36]。具体而言，首次解调的结果，即累积数据单元，将被划分为子单元，以执行二次定位检测过程，并作为参考信号；随后重新累积检测结果，得到一个镜头畸变更小的新数据单元。

II. 相关工作

所提出的 OAcode 是一种美学二维条码方案，它将信息嵌入一幅图像中。因此，本节首先回顾一些相关的美学二维条码方案，然后讨论美学二维条码与一些信息嵌入技术之间的区别。

A. 美学二维条码

与外观醒目的传统二维条码（图 2(a) 和 (b)）相比，美学二维条码（图 2

[1]根据条码术语，用于表示比特“0”或“1”的黑白外观最小方形单元称为模块。

(c)~(i))具有人类可读性，更加美观，并且能够更好地融入营销材料。此外，几乎所有美学二维条码方案都采用相同的设计，即位置检测图案与美化数据区域的组合，其中，它们的位置检测图案与传统二维条码的位置检测图案具有相似的外观和相同的功能。例如，我们可以发现，图2 (c)~(h)中的位置检测图案结构与图2 (a)和(b)所示的结构相似。

现有的美学二维条码方案根据设计目的大致可分为两类。第一类通过修改现有的传统二维条码方案生成。这类方案与标准提取器兼容，且视觉质量更好。由于二维码应用广泛，这类方案中的大多数都是经过美化的二维码方案 [9], [22]–[27]。图 2 (c)~(f) 展示了一些示例。这些方案通常会修改二维码的生成过程，主要是调制过程，以提升视觉质量。为了保持兼容性，它们保留了与二维码相同的提取过程，因此具有相同的位置检测图案。

另一类包括独立于现有黑白二维条码生成的美学二维条码方案 [10]–[12], [28], [29]。这类方案无需与现有的二维条码提取器兼容。因此，与上述类别中的方案相比，它们通常拥有更大的设计自由度，性能也更好。如图 2 (g) 和 (h) 所示，这类美学二维条码在视觉上的一项显著改进是可以设计更小的位置检测图案，这通常意味着它们的外观更接近背景图像，视觉质量也更好。

所提出的 OAcode 属于第二类，但与先前方案相比，OAcode 的设计截然不同，即移除了位置检测图案。因此，OAcode 在视觉上更接近一幅图像（图 2（i）），也能更好地融入一张海报（图 1（b））。

B. 信息嵌入技术

我们将讨论以下信息嵌入技术，包括水印、隐写术和深度数据隐藏。水印和隐写术是信息隐藏的两大主要分支 [37], ，其中数字图像水印 [36], [38]–[40] 常用于证明图像所有权，其设计侧重于视觉上的不可感知性，以及对各种数字图像失真的鲁棒性。隐写术 [41]–[43]用于隐蔽通信，因此相应的方法侧重于嵌入秘密消息的安全性和容量，其中安全性通常意味着隐藏消息不会被隐写分析者察觉。深度数据隐藏 [44]–[47]是一类新兴技术，利用神经网络在图像中隐藏信息，并通过相机拍摄提取信息。深度数据隐藏侧重于应对相机拍摄失真的鲁棒性，这类失真比数字图像失真更严重。

尽管 OAcode 的外观与上述其他信息嵌入技术相似，但它遵循

表 I：信息嵌入技术和美学二维条码的不同设计标准。

图片嵌入方法	鲁棒性	不可感知性	容量
隐写术	low	high	high
数字水印	媒介	媒介	low
深度数据隐藏	high	媒介	媒介
美学二维条码	high	low	high

与其他美学二维条码方案相同的设计准则，因此 OAcode 有别于这些信息嵌入技术。具体而言，二维条码方案始终使用模块表示比特“0”或“1”。例如，二维码的模块是黑白方形单元，而 OAcode 使用扩频模块。随后，在混合过程中，背景图像只会影响这些模块的混合强度。基于模块，二维条码方案可以设计参数确定策略，使检测器能够提取参数未知的二维条码，例如容量未知的二维条码。考虑到各种应用场景对二维条码的容量和鲁棒性要求各不相同，这种策略使采用不同设置的二维条码都能由同一个检测器解码。相比之下，对于上述大多数信息嵌入技术，图像内容与嵌入信息共同决定宿主图像的修改强度和模式，以便更好地平衡鲁棒性与不可感知性。此外，它们的端到端设计在参数预设时性能出色，但不适用于参数可变的输入。

如表 I 所总结，这四个研究领域面向不同的应用，关注重点和设计标准也各不相同。

III. 对称性计算

所提出的 OAcode 采用了一种新颖的同步过程，其中利用其对称性作为校准信号。为快速计算对称性，我们对 Ma 等人提出的方法 [48] 进行了略微修改。本节首先定义二维矩阵的对称性，然后介绍其计算方法。

1) 对称性定义：若二维矩阵 $\boldsymbol{A}$ 关于点（x_s, y_s）对称，则 $\boldsymbol{A}$ 满足：

$$A(x_s - x, y_s - y) = A(x_s + x, y_s + y). \tag{1}$$

点（x_s, y_s）是 $\boldsymbol{A}$的一个对称中心。 $\boldsymbol{A}$ 关于点（i, j）的对称性 $\boldsymbol{S}$ 可定义为：

$$S(i, j) = \sum_x \sum_y A(i - x, j - y)A(i + x, j + y). \tag{2}$$

$\boldsymbol{S}(i, j)$ 实际上是 $\boldsymbol{A}$ 与围绕点（i, j）翻转后的 $\boldsymbol{A}$ 之间的相关性。同时，给定一个点（i, j），$\boldsymbol{S}(i, j)$ 的值表示点（i, j）是 $\boldsymbol{A}$ 的对称中心之一的可能性。在理想情况下，$\boldsymbol{S}$ 中对称峰的位置就是 $\boldsymbol{A}$ 中对称中心的位置。

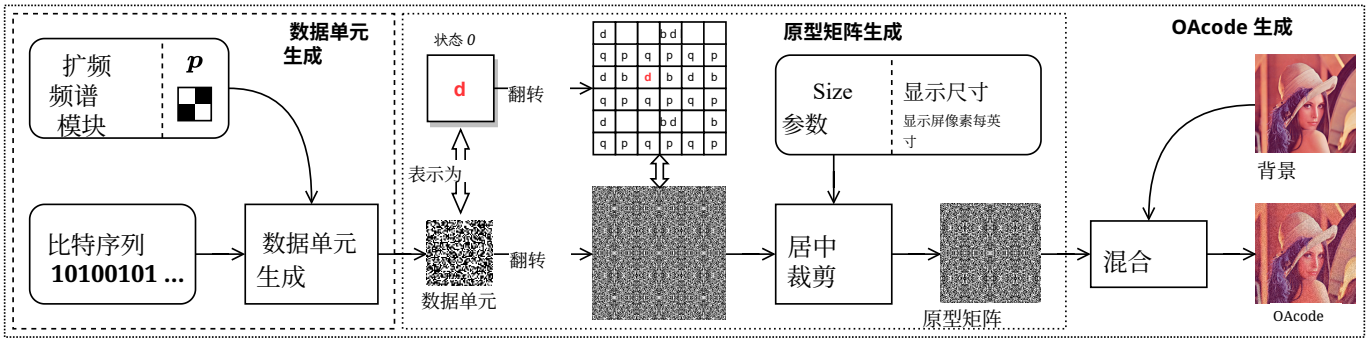


图 3. OAcode 的生成 过程，包括数据单元生成、原型矩阵生成和混合过程。

2）自卷积函数：显然，像公式（2）那样在空间域中计算对称性效率低下，尤其是当 $\boldsymbol{A}$ 的尺寸较大时。为降低公式（2）的计算成本，首先将其改写为：

$$\begin{aligned} S(i,j) &= \sum_x \sum_y A(i-x, j-y)A(i+x, j+y) \\ &= \sum_x \sum_y A(x,y)A(2i-x, 2j-y), \end{aligned} \tag{3}$$

其中， x 和 y 遍历使 $\boldsymbol{A}$的下标合法的所有取值。定义一个临时矩阵 $\boldsymbol{T}$， $T(2i,\ 2j) = S(i,\ j)$，并将其代入公式 (3)：

$$\begin{aligned} T(2i,2j) &= \sum_x \sum_y A(x,y)A(2i-x, 2j-y) \\ T(u,v) &= \sum_x \sum_y A_p(x,y)A_p(u-x, v-y), \end{aligned} \tag{4}$$

其中， $\boldsymbol{A}_p$ 是将 $\boldsymbol{A}$ 零填充至原尺寸的两倍。可以观察到，$\boldsymbol{T}$ 是 $\boldsymbol{A}_p$的自卷积。因此，可以利用卷积定理得到式（4）的频域形式，如下所示：

$$\boldsymbol{T} = IFFT[FFT(\boldsymbol{A}_p)FFT(\boldsymbol{A}_p)], \tag{5}$$

其中， FFT 表示快速傅里叶变换， $IFFT$是相应的逆变换。考虑到 $\boldsymbol{T}$ 是 $\boldsymbol{S}$的两倍上采样，二维矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的对称性 $\boldsymbol{S}$ 可计算如下：

$$\boldsymbol{S} = \mathcal{D}(IFFT[FFT(\boldsymbol{A}_p)FFT(\boldsymbol{A}_p)]), \tag{6}$$

其中，D(·)是一个下采样函数，可将输入矩阵缩小至一半尺寸。利用自卷积函数的频域形式，计算对称性 $\boldsymbol{S}$ 的计算成本从式（2）到式（6）大幅降低。

需要指出的是，与 [48], 相比，OAcode针对信息容量较大时的透视畸变提出了一种全面的恢复策略，并针对二维条码扫描过程进行了优化，其中包括在不存在对称峰时估计透视变换（第 V-B 节），以及针对镜头畸变的解调增强方案（第 V-D2 节）。

IV. OAcode 生成

图 3 展示了 OAcode 的生成流程。输入消息被转换为比特序列，以生成数据单元。随后，将数据单元翻转以生成一个对称矩阵，再根据一组尺寸参数对其进行裁剪，从而生成原型矩阵。最后，将原型矩阵与背景图像融合，得到 OAcode。

A. 数据单元生成

输入消息被转换为比特序列，并重塑为尺寸为 $L_m \times L_m$的二维比特矩阵 $\boldsymbol{m}$ 。随后，使用 $\boldsymbol{p}$ 对 $\boldsymbol{m}$进行扩频编码，以生成数据矩阵$\boldsymbol{D}$；其中， $\boldsymbol{p}$ 是扩频模块，是由 ± 1 元素像棋盘格一样交替排列而成的双极性矩阵。在扩频过程中，二维比特矩阵 $\boldsymbol{m}$ 中的比特“1”在数据矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中表示为 $+1 \times \boldsymbol{p}$ ，比特“0”在 $\boldsymbol{m}$ 中表示为 $-1 \times \boldsymbol{p}$ ，在 $\boldsymbol{D}$ 中表示。根据扩频理论，在更大的带宽上传输可以增强抵御外部窄带干扰 [49],[50]的鲁棒性。因此，在屏幕-相机过程中，我们可以使用尺寸更大的扩频模块，以提高对成像失真的鲁棒性，例如模糊、噪声和压缩。最后，使用随机双极性矩阵作为掩模矩阵 $\boldsymbol{K}$ ，对$\boldsymbol{D}$ 进行掩模处理，生成数据单元 $\boldsymbol{U}$：

$$U(i,j) = D(i,j)K(i,j), \tag{7}$$

其中， i 和 j 表示这些矩阵的索引。掩码操作使数据单元 $\boldsymbol{U}$ 中黑白像素的分布更加随机，有利于OAcode提取。此外，还将利用掩模矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和扩频模块 $\boldsymbol{p}$ 来估算提取过程中所需的参数，例如OAcode的信息容量。

B. 原型矩阵生成

数据单元 $\boldsymbol{U}$ 未旋转且未翻转的状态被定义为初始状态状态 *0*。然后，将处于状态 *0* 的数据 $\boldsymbol{U}$ 进行翻转，生成一个具有多个对称中心的对称矩阵，这些对称中心位于数据单元的角上。为更好地说明翻转过程，处于状态 *0*的 $\boldsymbol{U}$ 用一个红色加粗的符号“d”方块表示；见

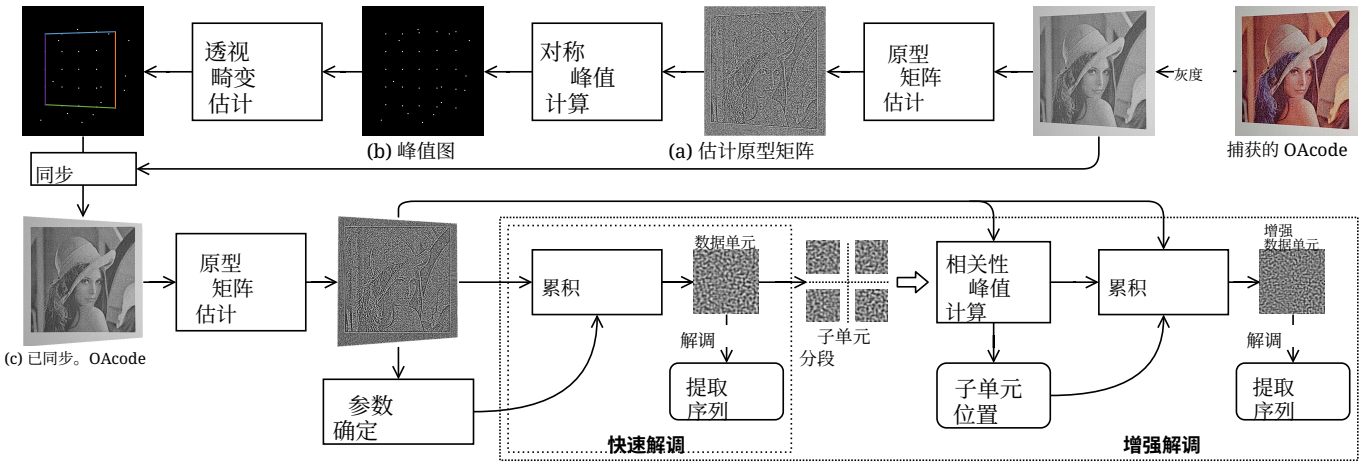


图 4。OAcode 的提取过程。在（a）中，利用输入捕获的 OAcode 估计原型矩阵，并计算其对称峰以生成峰值图（b）。然后，根据峰值图估计透视畸变的参数，从而同步 OAcode。最后，对同步后的 OAcode（c）实施两阶段解调，以提取消息序列。

图 3。翻转过程结束后，该数据单元位于全局对称中心的左上方。在 OAcode 提取过程中，参数确定策略将使用这种位置关系。

然后，对称矩阵经过中心裁剪，生成具有目标尺寸的原型矩阵，该目标尺寸由两个尺寸参数决定，包括显示屏的像素每英寸（PPI） p 和目标显示尺寸L_d。具体而言，裁剪尺寸 L_c 可通过以下公式计算：$L_c = (L_d \times p)/C_f$，其中 $C_f = 2.54$ 是英寸与厘米之间的换算系数。例如，如果我们需要在 iPad mini 2 上显示尺寸为 $5 \times 5cm$、PPI 为 $p = 324$ 的 OAcode，将上述参数代入后，可以得到裁剪尺寸 $L_c = 638$，这意味着 OAcode 应为 638×638像素大小，才能达到目标显示效果。

一个值得注意的问题是，所确定的原型矩阵尺寸会限制可用的信息容量。这是合理的，因为我们无法在有限区域内显示一个信息容量很大的、可访问的二维条码。对于 OAcode，信息容量越大，数据单元的尺寸也越大，因此在尺寸固定为 L_c 的原型矩阵中，翻转的数据单元就越少。然而，为了更好地检测 OAcode，其中应有足够多的对称中心，即足够多的数据单元。OAcode 的尺寸参数与信息容量相互制约。本文为实现更好的提取效果，所选参数可使原型矩阵 $\boldsymbol{P}$ 包含 5×5 个或更多对称中心，即 $\boldsymbol{P}$ 中超过 5×5 个数据单元。

C. 混合

现在我们有一个双极性原型矩阵 $\boldsymbol{P}$，并将其与输入背景图像 $\boldsymbol{I}$ 融合，生成美化后的$\boldsymbol{P}$，即 OAcode $\boldsymbol{O}$。假设背景图像 $\boldsymbol{I}$ 是 8 位灰度图像，其取值范围为 0 到 255，且已调整为与 $\boldsymbol{P}$相同的尺寸。所提出的 OAcode $\boldsymbol{O}$ 可以通过以下方式简单生成：

$$O(i,j) = I(i,j) + \lambda P(i,j), \tag{8}$$

其中 λ 为混合强度。但考虑到裁剪强度，当背景图像中包含较亮或较暗的内容时，根据公式（8）生成的 OAcode 会变弱。为解决上述问题并平衡视觉质量与提取性能，提出一种采用自适应强度的调制方法：

$$\begin{aligned} O(i,j) &= I(i,j) + \lambda P(i,j) - 2\lambda(I(i,j)/255 - 0.5) \\ &= I(i,j) + \lambda\left(P(i,j) + 1 - \frac{2}{255}I(i,j)\right). \end{aligned} \tag{9}$$

由公式（9）生成的 OAcode 在较暗的图像内容中更亮，而在较亮的内容中更暗，这与误差扩散抖动的结果类似。此外，公式（9）可以通过矩阵运算以较低的计算成本完成。在彩色背景图像的情况下，首先将输入图像从 RGB 通道转换为 $YCbCr$ 通道，并取其 $\boldsymbol{Y}$ 分量作为 $\boldsymbol{I}$ 执行上述运算。最后，将灰度 OA码与 $\boldsymbol{Cb}$、$\boldsymbol{Cr}$ 分量结合，转换回彩色 OAcode。

V. OAcode提取

图 4 展示了所提出的 OAcode 的提取过程，其中假设相机捕获的 OAcode 是唯一的输入。为了同步捕获的 OAcode，我们首先估计原型矩阵并计算其对称峰，这些峰表示数据单元角点的位置，可用于估计 OAcode 上出现的几何畸变，主要是透视畸变。校正透视畸变后，与其他二维条码方案相同，我们估计解调 OAcode 所需的参数，包括旋转状态、信息容量版本和模块大小。基于这些参数，可以将 OAcode 解调为比特序列。

此外，为了抵抗镜头畸变，我们提出了增强解调，以进一步提高提取准确率。

A. 对称峰计算

在此过程中，以捕获的 OAcode 为输入，计算其对称峰值图 $\boldsymbol{M}$，用于后续的 OAcode 同步。

首先将捕获的 OAcode 转换为灰度OA码$\boldsymbol{O'}$。然后，为了减小背景图像的影响，我们根据原型矩阵近似噪声的外观，从 OAcode $\boldsymbol{O'}$ 中分离出原型矩阵 $\boldsymbol{P}$。具体而言，可按照 [48], [51]通过滤波估计原型矩阵 $\boldsymbol{P}$：

$$\widehat{\boldsymbol{P}} = (\boldsymbol{O'} - \boldsymbol{\mu})\frac{\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{P}}^2}{\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{O'}}^2}, \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{P}$ 是估计得到的原型矩阵（图 4 (a)），$\boldsymbol{\mu}$ 是 $\boldsymbol{O'}$的局部均值，$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{P}}^2$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{O'}}^2$ 分别是 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{O'}$的局部方差。需要注意的是，$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{P}}^2$ 是一个常数矩阵，其取值主要取决于式（8）中的强度 λ。因此，式（10）可简化为：

$$\widehat{\boldsymbol{P}} = \frac{\boldsymbol{O'} - \boldsymbol{\mu}}{\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{O'}}^2}. \tag{11}$$

然后，可通过第 III-2 节中提到的自卷积函数的频域形式，计算 $\boldsymbol{P}$ 的对称矩阵 $\boldsymbol{S}$，如下所示：

$$\boldsymbol{S} = \mathcal{D}(IFFT[FFT(\widehat{\boldsymbol{P}}_p)FFT(\widehat{\boldsymbol{P}}_p)]), \tag{12}$$

其中，$\widehat{\boldsymbol{P}}_p$表示将原始尺寸扩大为两倍后进行零填充，D（·）是一个下采样函数，用于将输入矩阵缩放至原尺寸的一半。

最后，采用自适应对称峰值滤波器生成对称峰值图，如下所示：

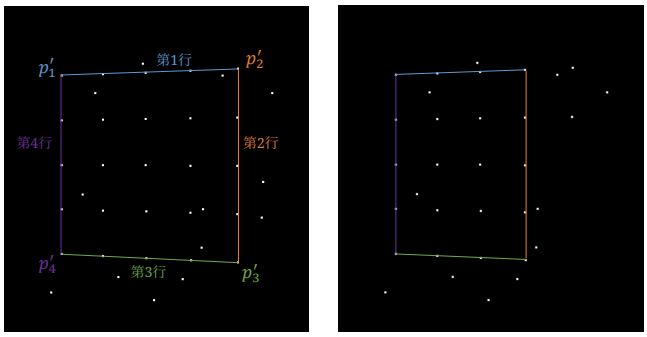
$$\boldsymbol{M} = \begin{cases} 1 & , \quad if \quad \boldsymbol{S} > \boldsymbol{\mu_S} + \beta\boldsymbol{\sigma_S^2} \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases} \tag{13}$$

其中，$\boldsymbol{\mu_S}$ 和$\boldsymbol{\sigma_S^2}$ 分别表示 $\boldsymbol{S}$的局部均值和方差。系数 β 是一个可调参数，用于控制经过滤波的对称峰数量。如第 IV-B 节所述，原型矩阵 $\boldsymbol{P}$中应有超过25个对称中心。因此，如图4（b）所示，考虑到潜在的噪声峰值，我们不断调整 β，直到峰值图 $\boldsymbol{M}$ 中的峰值数量略多于预期的25个。

B. 透视畸变校正

在此过程中，我们从对称峰值图 $\boldsymbol{M}$ 中估计透视畸变参数，并对捕获的 OAcode 进行相应的校正。

对于峰值图 $\boldsymbol{M}$，首先要解决的技术问题是：如何区分对称峰和噪声峰值？假设噪声生成的峰值是随机分布的，我们可以利用对称峰的规则分布来进行区分。这种规则分布源于数据单元的网格状排列。具体来说，这些



（a） $\boldsymbol{M}$的直线检测结果。　（b）畸变后的 $\boldsymbol{M}$ 的另一种结果。

图 5. 相似峰值图 $\boldsymbol{M}$s 的两种不同直线检测结果。(b) 中的峰值图遗漏了右下方的一些峰值，导致检测到的右侧直线更靠近中心。

对称峰表示数据单元的角点，因此也位于数据单元的边缘，并成组分布在不同的直线上。因此，我们使用霍夫变换检测穿过这些对称峰的直线。如图 5 (a) 所示，在所有检测到的直线中，我们选取最外侧的四条直线 直线*1*、直线*2*、直线*3*、直线*4* 并计算它们的交点 p_1'、p_2'、p_3'、p_4'，这些交点构成已知点集 P′。为了恢复透视畸变，我们还需要目标点集 P，其点 p_1、p_2、p_3、p_4具有 P′ 中各点未经畸变的原始坐标。

理想情况下，已知点集 P′ 中的点是 OAcode 最外侧的四个数据单元角点，其相对位置很容易确定。然而，考虑到相机拍摄过程中的严重畸变，有时会在 $\boldsymbol{M}$ 中漏掉一些峰值。图 5(b) 展示了漏掉一些对称峰时另一种可能的直线检测结果。因此，第二个技术问题是：如何在不同的直线检测结果下确定目标点集 P? 例如，图 5(a) 和 (b) 中有两个不同的目标点集 P。我们的解决方案利用了数据单元等间距这一特点，这意味着即使发生透视畸变，同一直线上任意两个对称峰之间的距离也相近。我们记录直线 *1*~ 直线*4* 上每两个相邻点之间的所有距离，并使用 K均值聚类找出最大的距离簇，将其平均值作为数据单元边长的估计值，记为 L_u。设直线*1*~ 直线*4* 的长度为 L_1~L_4，则目标点集 P 可计算为：

$$\begin{aligned}
p_1(x_1, y_1) &= (x_1, y_1) \\
p_2(x_2, y_2) &= \left(x_1 + \mathcal{R}\left(\frac{L_1 + L_3}{2L_u}\right)L_u, y_1\right) \\
p_3(x_3, y_3) &= \left(x_1 + \mathcal{R}\left(\frac{L_1 + L_3}{2L_u}\right)L_u, y_1 + \mathcal{R}\left(\frac{L_2 + L_4}{2L_u}\right)L_u\right) \\
p_4(x_4, y_4) &= \left(x_1, y_1 + \mathcal{R}\left(\frac{L_2 + L_4}{2L_u}\right)L_u\right),
\end{aligned} \tag{14}$$

其中，R(·)为舍入函数。 p_1的坐标没有特定约束，我们通过经验确定 $p_1 = p_1'$

。最后，将 P′ 和 P 中点的所有坐标（x'， y'）和（x， y）代入以下方程：

$$x = \frac{a_1x' + b_1y' + c_1}{a_0x' + b_0y' + 1}$$
$$y = \frac{a_2x' + b_2y' + c_2}{a_0x' + b_0y' + 1}, \tag{15}$$

我们可以求解这些方程，得到透视畸变校正所需的全部参数a_0, b_0, a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2 。如图 4 (c) 所示，捕获的 OAcode 将同步至正方形状态。

C. 参数确定

为了对校正后的 OAcode 进行解调，需要确定三个参数，包括旋转状态、信息容量和扩频模块。在大多数传统及美观型二维条码方案中，这些参数通过可见位置检测图案来检测。对于所提出的不含位置检测图案的 OAcode，我们设计了一种基于 OAcode 统计特征的参数确定策略。

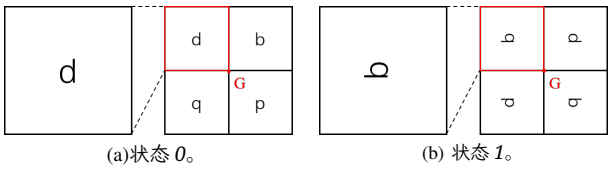
首先，我们选取 OAcode 中的一个特定数据单元进行分析。上一小节中的同步 OAcode 用于估计同步原型矩阵，估计过程遵循第 V-A 节所述的相同$\widehat{}$方法。为简化记号，将其记为 $\boldsymbol{P}$ 。在不存在透视畸变的情况下，同步原型矩阵的$\widehat{}$对称性 $\boldsymbol{P}$ 将显著增强。因此，可以合理地假设，所有对称峰均可通过式 (12) 和$\widehat{}$式 (13) 检测到，即 $\boldsymbol{U}$中的所有数据单元 $\boldsymbol{P}$ 均可定位。随后，选取全局对称中心**G** 左上方的数据单元作为待分析的数据单元，记为 $\boldsymbol{U}_a$。

根据第 IV-B 节中的设置，$\boldsymbol{U}_a$有两种可能的状态，如图 6 所示。当 OAcode 未旋转或旋转 $180°$ 时，$\boldsymbol{U}_a$ 为原始状态，即状态 *0*。如果 OAcode 旋转 $90°$ 或 $270°$，$\boldsymbol{U}_a$ 则为状态 *1*。扩频矩阵$\boldsymbol{p}$ 的信息容量和尺寸取决于 OAcode 生成过程中的设置。本文中，OAcode 有两种容量设置，分别记为容量 *0* 和容量 *1*，以及三种扩频模块尺寸，分别记为模块 *0*、模块 *1*和模块 *2*。

对于所有可能的状态 *i*、容量 *j*和模块 *k*，可按以下步骤计算这些参数正确的置信度 C_{ijk} 。根据状态 *i*，首先将 $\boldsymbol{U}_a$ 旋转并翻转回状态 *0*。然后，将 $\boldsymbol{U}_a$ 缩放至由容量 *j* 和模块 *k*确定的预期尺寸。例如，在容量 *0* 和模块 *0*的情况下，数据单元由 $L_m \times L_m$ 个扩频模块 $\boldsymbol{p}$s 生成，其中 $L_m = 32$ 且 $\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$。因此， $\boldsymbol{U}_a$ 的预期尺寸为64×64。然后，我们使用与第 IV-A 节相同的掩模矩阵 $\boldsymbol{K}$ 对 $\boldsymbol{U}_a$ 进行去掩模，以获得对应的数据矩阵 $\boldsymbol{D}_a$:

$$D_a(x, y) = U_a(x, y)K(x, y), \tag{16}$$

其中， x 和 y 表示这些矩阵的索引。如果所有参数都正确，数据矩阵 $\boldsymbol{D}_a$ 将由扩频矩阵 $\boldsymbol{p}$ 和 $-\boldsymbol{p}$组成。但如果任何参数有误， $\boldsymbol{D}_a$ 将是错误



(a)状态 *0*。 (b) 状态 *1*。

图 6. 所分析数据单元 $\boldsymbol{U}_a$的两种可能状态，即全局对称中心 **G**左上方的 OAcode 数据单元。

解掩模的结果，接近一个随机矩阵。我们将 $\boldsymbol{D}_a$ 划分为 $L_m \times L_m$ 个不重叠的块，其尺寸与 $\boldsymbol{p}$相同。将块记为 $\boldsymbol{D}^{x,y}_a$，置信度 C_{ijk}的计算公式为：

$$C_{ijk} = \sum_{x}^{L_m} \sum_{y}^{L_m} \left| \langle \overline{\boldsymbol{D}}^{x,y}_a, \boldsymbol{p} \rangle_{\mathbf{F}} \right|, \tag{17}$$

其中 $\overline{\boldsymbol{D}}^{x,y}_a$是归一化的 $\boldsymbol{D}^{x,y}_a$且 $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbf{F}}$是弗罗贝尼乌斯内积：两个矩阵逐分量的内积。最后，$\boldsymbol{U}_a$ 的状态 *i*、容量 *j* 和模块 *k* 可由下式确定：

$$i, j, k = \arg\max_{i,j,k} C_{ijk}. \tag{18}$$

其余数据单元具有与$\boldsymbol{U}_a$相同的容量 和模块，并且可根据它们与 $\boldsymbol{U}_a$的相对位置轻松确定其状态 。

D. 解调

我们提出了一种两阶段解调方法，以满足 OAcode 解调过程中对准确率和计算成本的不同要求。第一阶段采用计算成本较低的快速解调方法。在大多数情况下，其解调结果已足够准确。当用户追求更高的解调准确率时，则采用第二阶段的增强解调，这能显著降低镜头畸变造成的解调误差。

1）快速解调：根据第 V-C 节确定的数据单元的位置和参数，我们将所有数据单元还原为状态 *0* 并将其累积，生成$\widehat{}$一个累积数据单元 $\boldsymbol{U}$。累积操作可以有效降低随机噪声的影响。与第 V-C 节类似，我们根据其容量和模块，将累积数据单元调整为预期尺寸。然后，使用掩模矩阵 $\boldsymbol{K}$ $\widehat{}$对$\widehat{}$累积数据单元 $\boldsymbol{U}$ 进行去掩模处理，得到数据矩阵 $\boldsymbol{D}$，再将其划分为 $L_m \times L_m$ 互不重叠且经过归一化的区块 $\widehat{\boldsymbol{D}}^{x,y}$。为了对数据矩阵 $\widehat{\boldsymbol{D}}$进行解扩频，计算 $\widehat{\boldsymbol{D}}^{x,y}$ 与 $\boldsymbol{p}$ 之间的相关性$\rho_{x,y}$：

$$\rho_{x,y} = \langle \widehat{\boldsymbol{D}}^{x,y}, \boldsymbol{p} \rangle_{\mathbf{F}}, \tag{19}$$

其中， $\langle$ 、 $\rangle_{\mathbf{F}}$ 为弗罗贝尼乌斯内积，
$\widehat{}$ x y 和表示 $\boldsymbol{D}$中的块索引，扩频模块 $\boldsymbol{p}$ 由模块参数确定。然后，

消息矩阵 $\boldsymbol{m}'$ 可以通过以下方式提取：

$$m'_{x,y} = \begin{cases} 0 & , \quad \rho_{x,y} < 0 \\ 1 & , \quad \rho_{x,y} \geq 0 \end{cases} \tag{20}$$

最后，我们将信息矩阵重塑为比特序列，即提取的信息。

2）增强解调：考虑到捕获的 OAcode 中存在难以察觉的镜头畸变，采用增强解调可以进一步提高快速解调的准确性，因为它能够减轻镜头畸变的影响。我们首先讨论镜头畸变如何影响解调准确性，然后说明增强型解调方法的实现。

在快速解调中，OAcode 中的所有数据单元都会累积起来，得到一个累积数据单元 $\boldsymbol{U}$ ，以增强有用信号并减弱随机噪声。然而，不同数据单元中的镜头畸变各不相同，这会导致数据单元累积时出现错位，并削弱累积效果。忽略其他因素时，摄像机拍摄的 OAcode 中单个块的尺寸越小，镜头畸变越弱，错位导致的误码率也越低。受此规律启发，我们设计了以下增强型解调方法。

在这种增强解调中，直到生成累积数据单元$\widehat{\ }$的步骤 $\boldsymbol{U}$ 都与快速$\widehat{\ }$解调方法相同。然后， $\boldsymbol{U}$ 用于对数据单元进行第二次位置检测，而不是直接进行解调。数据单元的第一次位置检测见第 V-A 节，其中通过自卷积函数将数据单元的角点检测为对称峰。数据单元的第二次位置检测基于通过累积数据单元 $\boldsymbol{U}$ 与$\widehat{\ }$同步原型矩阵 $\boldsymbol{P}$之间的$\widehat{\ }$互相关计算得到的相关峰。为减小镜头畸变的影响，我们采用较小的子单元执行第二次位置检测。具体而言，如图 7(a)所示，我们将累积数据单元 $\boldsymbol{U}$ 划分为 $\widehat{n} \times n$ 个互不重叠的子单元 $\widehat{\boldsymbol{U}}^{x,\ y}$。将 L_x 和W_y 分别记为子单元 $\widehat{\boldsymbol{U}}^{x,\ y}$的长度和宽度，并将 L_U 记为$\widehat{\ }$累积数据单元 $\boldsymbol{U}$的尺寸， L_x 和W_y 可通过以下方式确定：

$$L_x = \begin{cases} \lfloor \frac{L_u}{n} \rfloor & , \quad x \in [1, n-1] \\ L_U - (n-1)\lfloor \frac{L_u}{n} \rfloor & , \quad x = n \end{cases}$$
$$W_y = \begin{cases} \lfloor \frac{L_u}{n} \rfloor & , \quad y \in [1, n-1] \\ L_U - (n-1)\lfloor \frac{L_u}{n} \rfloor & , \quad y = n \end{cases} \tag{21}$$

然后，子单元 $\widehat{\boldsymbol{U}}^{x,y}$ 与$\widehat{\ }$同步原型矩阵 $\boldsymbol{P}$ 之间的互相关 $\boldsymbol{C}_{xy}$ 可通过以下方式计算：

$$\boldsymbol{C}_{xy} = IFFT[FFT(\widehat{\boldsymbol{U}}^{x,y}) FFT(\widehat{\boldsymbol{P}})^*] \tag{22}$$

其中， $*$ 表示矩阵的共轭。如图 7 (b) 所示，根据相关峰 $\boldsymbol{C}_{xy}$，我们可以定位对应的子单元，并将它们累加以生成一个增强的子单元。对所有可能的 x 和 y重复上述操作，即可获得镜头畸变较小的增强数据单元。如图 7 (c) 和 (a) 所示，增强后的数据单元清晰得多，误码率也远低于原始数据单元（1.43% 对 11.18%）。在

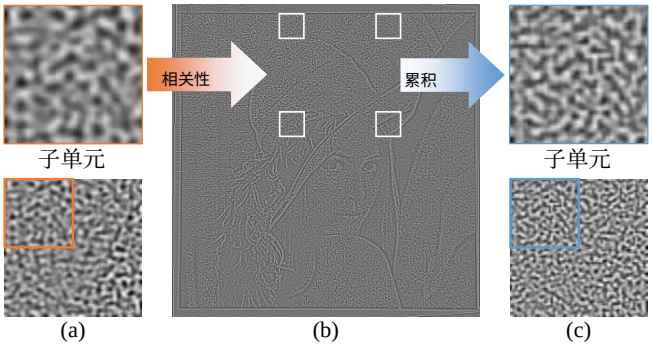


图 7. 数据单元第二次位置检测的示例。(a) 为累积后的数据单元，它被划分为 4 个子单元。(b) 为同步原型矩阵，其中白色边框表示一个子单元的检测结果。(c) 为增强后的数据单元，由这些检测出的子单元累积生成。

实际应用中，增强子单元仅由相关峰最高的四个子单元累加得到，因为较弱的相关峰意味着子单元不够清晰，带来的干扰大于改善效果。最后，按照第 V-D1 节中相同的流程对增强数据单元进行解调。

VI. 实验评估

A. 实验方法

本小节介绍默认实验设置。对于特定实验，除部分参数有所调整外，大多数实验参数均与默认设置相同。

在 OAcode 生成过程中，原型矩阵设为 32×32 （1024）比特的信息容量，并由 3×3 尺寸的扩频模块 $\boldsymbol{p}$ 进行调制。随后，将原型矩阵裁剪至 640×640 像素，并与背景图像混合，生成待测试的 OAcode，其中混合强度 λ 设为 20。

在提取过程中，使用两台屏幕显示 OAcode。一台是 iPad mini 2，其分辨率为 2048×1536像素，PPI（像素每英寸）为 324。另一台是华为 P30 Pro，分辨率为 2340×1080 像素，PPI 为 398。对于默认尺寸设为 640×640 像素的 OAcode，其在 iPad min 2 上的显示尺寸为 $5 \times 5cm$，在华为 P30 Pro 上的显示尺寸为 $4 \times 4cm$。屏幕照度设为 $80 \pm 10lux$。随后，使用两部手机 iPhone 11 和小米 Mi 6 拍摄 OAcode，拍摄分辨率限制为 720p（1280×720 像素），屏幕与摄像头距离为 $10cm$。相机拍摄过程在室内进行，照度约为 $300lux$。在增强解调中，除非另有说明，累积后的数据单元会被划分为 2×2 个子单元，以进行第二次位置检测。

需要指出的是，OAcode 的以下性能是在实验参数明确设定的条件下评估的，因此，对于采用新设备或新参数的情况，可以合理推断 OAcode 的部分性能，例如可用距离。

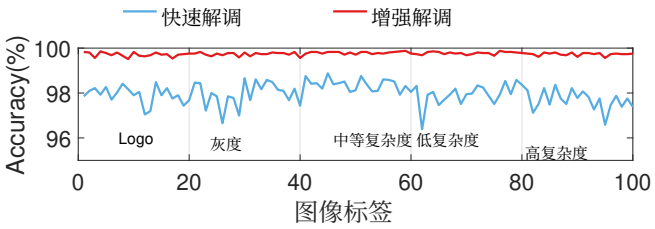
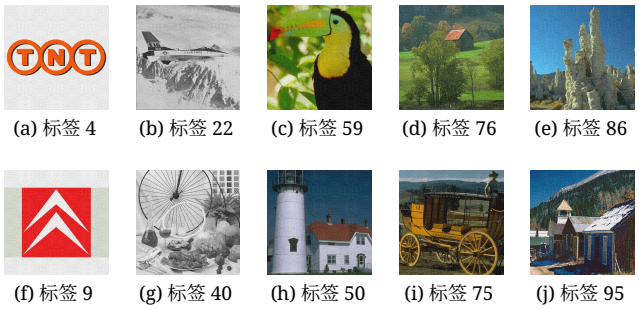


图 8. OAcode 的整体性能。



(a) 标签 4 (b) 标签 22 (c) 标签 59 (d) 标签 76 (e) 标签 86

(f) 标签 9 (g) 标签 40 (h) 标签 50 (i) 标签 75 (j) 标签 95

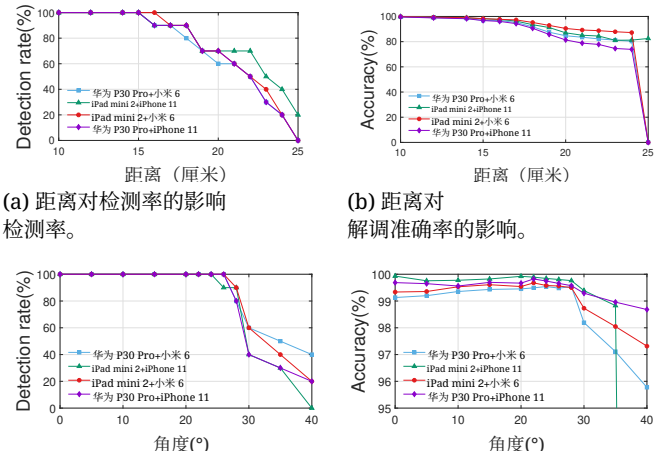
图 9。上排：五种图像类别中准确率最高的 OAcode。下排：准确率最低的 OAcode。

*B. OAcode*性能

1）整体性能：我们选取了 100 张背景图像来评估所提出 OAcode 的整体性能。为涵盖大多数应用场景，所选背景图像分为 5 类：标志、灰度图像、低复杂度彩色图像、中等复杂度彩色图像和高复杂度彩色图像。每类包含 20 张图像。标志图像选自 BelgaLogos数据集 [52]，其他图像来自 CVG-UGR图像数据库[53]。本文采用多尺度结构相似性指数（MS-SSIM）和峰值信噪比（PSNR）衡量 OAcode 的客观视觉质量。在本小节中，这些 OAcode 的平均 MS-SSIM 为 0.821，平均 PSNR 为 22.45。此外，我们邀请 20 位参与者评估 OAcode 的视觉质量，并规定黑白二维码和原始背景图像的评分分别为 1 分和 10 分。所提出的 OAcode 平均主观评分为 8.15，这得益于其类噪声数据区域，且没有可见位置检测图案。

提取结果如图 8 所示，其中，一个 OAcode 的解调准确率是从四种可能的屏幕-摄像头组合中提取的平均准确率。蓝线表示通过快速解调计算出的准确率，其最低值超过 96%。红线表示增强解调的解调结果，其最低值超过 99.5%。这些提取结果表明，所提出的 OAcode 在各种不同类别的背景图像上均具有很高的提取准确率。

选取每个类别中准确率最低和最高的图像作为代表性背景图像。如图 9 所示，由这 10 张代表性背景图像生成的 OAcode 将在后续实验中进行评估。



(a) 距离对检测率的影响检测率。 (b) 距离对解调准确率的影响。

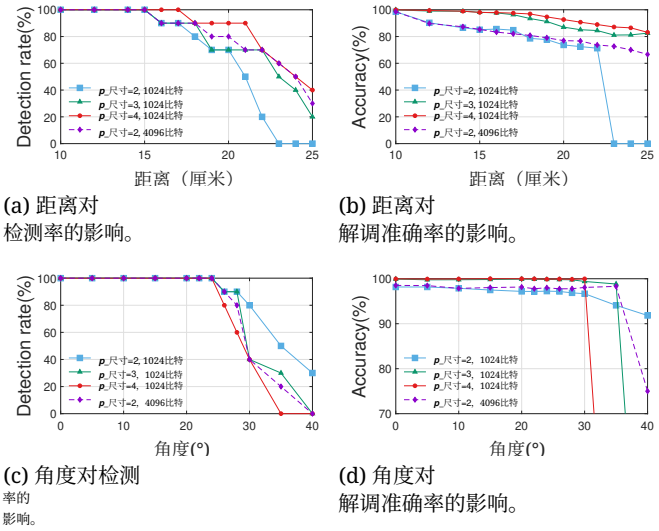
(c) 角度对检测率的影响。 (d) 角度对解调准确率的影响。

图 10. OAcode 的检测与解调范围。

2) 检测与解调范围：为评估 OAcode 在不同相机拍摄条件下的性能，在不同的屏幕—相机距离和角度下拍摄图 9 中的 10 个 OAcode。提取结果如图 10 所示，其中 (a) 和 (c) 展示了所拍摄 OAcode 的检测率，(b) 和 (d) 展示了解调准确率。我们采用检测率表示所拍摄 OAcode 能够重新同步的概率。随后对同步后的 OAcode 进行解调，以获取提取的信息，并将其比特恢复率作为解调准确率。

根据图 10 (a) 和 (b)，在屏幕与摄像头距离为 $15cm$ 时，OAcode 的检测率为 100%，解调准确率最高可达 96.76%。尽管屏幕与摄像头距离为 $20cm$时，OAcode 的检测率降至 60%，其解调准确率仍超过 80%。考虑到在二维条码应用中，使用多帧提取消息十分常见，因此理论上，在距离为 $20cm$时使用 3 帧，OAcode 的检测率可提高至 93.6%。由于 OAcode 的解调准确率很高，只要充分扫描，即使在距离为 $24cm$时也能提取 OAcode。在角度实验中，屏幕与摄像头的距离固定为 $10cm$。如图 10 (c) 和 (d) 所示，在屏幕与摄像头夹角为 $25°$ 时，几乎可以无误地检测和解调 OAcode。同样，在扫描角度为 $35°$ 时，理论上 OAcode 的解调准确率可超过 97%。

3）扩频模块尺寸的影响：扩频模块的尺寸 p, p_size 对 OAcode 的性能有相当大的影响。根据第 IV-B 节所述的参数间相互制约关系，当 OAcode 设置为 640×640 像素且信息容量为 1024 比特时，p 的尺寸只能是 2×2、3×3 或 4×4 像素，分别对应三种类型的 OAcode。随后，我们基于 10 张代表性背景图像生成 3×10 个 OAcode，并评估由 p_size 导致的性能差异。



(a) 距离对检测率的影响。 (b) 距离对解调准确率的影响。

(c) 角度对检测率的影响。 (d) 角度对解调准确率的影响。

图 11. 不同扩频模块生成的 OAcode 的检测与解调范围 p。

如图 11 所示，蓝线、绿线和红线分别展示了扩频模块尺寸为 $p\_size = 2$、3 和 4 像素的 OAcode 的检测与解调范围。当$p_size = 4$时，OAcode 在距离实验和角度实验中均具有最高的解调准确率（ $25cm$ 时为 83.13%， $30°$ 时为 99.98%）。此外，它在距离实验中的检测率也更高（ $25cm$时为 40%）。这些结果与第 IV-A 节所述结论一致，即扩频模块 p 尺寸越大，对成像失真的鲁棒性越强。

另一方面，扩频模块尺寸 p_size 越大，OAcode 中的数据单元越少，即峰值图中的对称峰越少，这会增加 OAcode 同步的难度。这解释了为什么在角度实验中，具有$p_size = 4$ 的 OAcode 检测率最低，如图 11 (c) 所示。相反，较小的 p意味着同步性能更好，但解调准确率更低。如图 11 (c) 所示，当 $p_size = 2$时，OAcode 的检测率相对较高，为 30%，角度为30°。但如图 11 (b) 和 (d) 所示，其解调准确率相对较低。对于由 3×3 尺寸的扩频模块生成的 OAcode，其检测和解调性能介于上述两者之间。

4) 最大信息容量：根据第 IV-B 节对参数的讨论，可以确定 OAcode 信息容量的上限。具体而言，一个 OAcode 中应包含超过 5×5 个数据单元，且扩频模块 p 应大于或等于 2×2 个像素。因此，OAcode 的最大比特像素率为 1/100。对于实验中使用的 640×640 像素 OAcode，其最大信息容量为 4096 比特，性能如图 11 中的紫色虚线所示。在 $18cm$ 屏幕与摄像头距离下，该 OAcode 的检测率为 90%，解调准确率超过 80%。此外，在 $25°$ 拍摄角度下，其检测率接近 100%，解调准确率超过 97%。

表 I：不同解调设置下的误码率降低幅度和提取时间开销。

子单元数量	1×1	2×2	3×3	4×4
误码率降低（%）	0	3.891	4.182	4.045
解调时间（秒）	1.48	3.13	5.52	8.64

5) 提取时间与性能：在搭载 AMD Ryzen 5 1600X CPU 和 NVIDIA GTX 1050 GPU 的个人电脑上，使用未经优化的 Matlab 实现时，快速解调的 OAcode 平均提取时间为 $1.48s$。如表 II 所示，对于增强解调，子单元数量会影响平均提取时间和解调准确率。采用 1×1 个子单元的增强解调与快速解调效果相当，耗时和性能相同，误码率（BER）降低 0%。随着子单元数量增加，增强解调平均可将 BER 降低约 4%，但耗时也会增加。需要注意的是，当子单元数量超过 2×2 时，BER 降幅的增益会逐渐减小。可能的原因是，在我们的摄像拍摄条件下， 2×2 个子单元几乎可以校正所有镜头畸变。因此，将增强解调的子单元数量设为 2×2 是合适的。

表 III：对比的美观二维条码方案的峰值信噪比，一种根据不含位置检测图案的数据区域计算，另一种根据整体二维条码计算。

PSNR	PiCode	RA Code	二维码图像	OAcode
仅数据区域	24.93	24.98	25.11	**25.12**
整体	15.04	15.98	10.40	**25.12**

6）美学二维条码对比实验：我们将所提出的 OAcode 与具有代表性的美学二维条码方案进行比较，包括 Picode [10], RA code[11], 和二维码图像 [9]。对于所有这些方法，我们采用与第 VI-B1 节相同的背景图像设置，其中包含 100 张不同类别的图像。为进行公平比较，对比实验的设置参照 [10], [11]。具体而言，在固定的屏幕与摄像头距离 $8cm$ 下，以两个角度 $0°$ 或 $20°$拍摄美学二维条码。其信息容量设置为 29×29 或 65×65 比特。由于所提出的 OAcode 不含位置检测图案，如表 III 所示，我们将美化前后数据区域的峰值信噪比设为相同水平，即 $25。03 \pm 0。1$。需要指出的是，如果也将位置检测图案视为对背景图像的修改，那么除所提出的 OAcode 外，整体美学二维条码的峰值信噪比都会急剧下降。

如表 IV 所示，在所有设置下，OAcode 都具有最高的提取准确率，高于 99%。此外，实验结果进一步证明了增强解调的有效性，尤其是在高信息容量下。在信息容量为 29×29 比特时，与快速解调相比，增强解调将

表 IV：不同容量和角度设置下 OAcode 与对比美学二维条码的提取准确率。

准确率（%）	PiCode	RACode	二维码图像	OAcode Fast	OAcode 增强
$29\times29, 0°$	88.361	97.366	95.321	97.079	**99.516**
$29\times29, 20°$	89.096	96.328	94.532	98.472	**99.409**
$65\times65, 0°$	94.998	97.686	90.793	91.667	**99.567**
$65\times65, 20°$	87.051	96.712	80.430	89.258	**97.887**

表 V：不同角度设置下 OAcode 与对比深度数据隐藏方法的提取准确率。

方法	Hidden Code	StegaStamp	OAcode
PSNR	34.035	34.011	**34.181**
准确率（%），0°	90.327	92.480	**93.245**
准确率（%），20°	87.122	90.770	**91.204**

解调准确率提高了约 2%。然而，在容量为65×65 比特时，增强解调所提高的准确率接近 10%。

7）深度数据隐藏对比实验：在最先进的深度数据隐藏方法中，有些方法的应用场景与二维条码相似。因此，我们选取了两种具有可用评估模型的代表性方法——StegaStamp [44] 和 Hidden Code [47] ——与 OAcode 进行比较。由于我们只有 Hidden Code 的预训练评估模型，且其参数难以修改，为了公平比较，我们对 OAcode 和 StegaStamp 进行了调整，使其与 Hidden Code 保持一致。具体而言，我们使用这些方法在大小为256 × 256 像素的背景图像中嵌入 196 比特，并将其峰值信噪比设为相同的 34。1±0。1。图像数据集和拍摄设置与第 VI-B6 节相同。如表 V 所示，在两种常见的相机角度下，OAcode 的提取准确率最高，超过 90%。一个可能的原因是，借助增强解调，OAcode 能更好地处理镜头畸变。此外，我们注意到，Hidden Code 和 StegaStamp 在徽标图像上的提取准确率相对较低，这可能是因为它们最初是为自然图像设计的。

8) 在其他设备或参数下的性能：采用参数明确定义的实验设置，其中一个优势是，对于新设备或参数，我们可以粗略估算 OAcode 的性能。具体而言，相机拍摄过程可建模为图 12：物理边长为 L_O 的 OAcode 在距离 d 处由相机拍摄，并转换为相机传感器上边长为 L_S 、分辨率为 r的图像。在此模型中，OAcode 最终的捕获像素尺寸 L_p 会显著影响 OAcode 提取结果，其与上述参数大致满足以下关系：
与上述参数大致满足以下关系：

$$L_p \propto L_S \cdot r \propto \frac{L_O \cdot r}{d}, \tag{23}$$

可用于估计新参数下 OAcode 的性能。例如，根据第 VI-B2 节中的实验结果，边长为

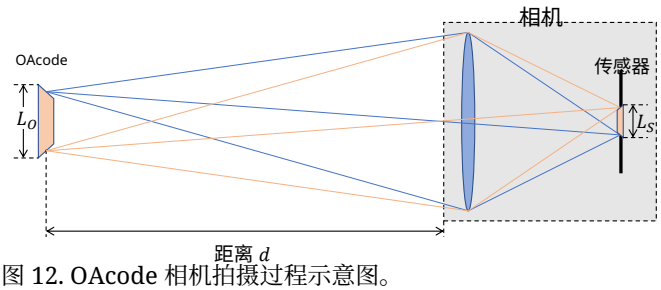


图 12. OAcode 相机拍摄过程示意图。

$L_O = 5cm$ 的 OAcode 在距离为 $d = 15cm$ 、相机分辨率为 $r = 1280\times720$像素的相机拍摄环境下，检测率达到 100%，解调准确率达到 96.76%。根据公式（23），当显示屏以双倍尺寸 $L_O = 10cm$ 显示 OAcode，且相机分辨率约为 720p 的三倍时，预计 OAcode 在 $2\times3 = 6$ 倍距离处仍具有相近的提取性能，即 $15\times6 = 90cm$。我们使用具有默认相机分辨率的不同品牌手机来验证这一假设。如表 VI 所示，在设备或参数更优的情况下，OAcode 具有更长的可用距离，并且大致符合公式（23）中的关系。

表 VI：不同手机在距离为 $90cm$处拍摄的 OAcode 的检测率和解调准确率。

手机	小米 Mi6	Redmi K40	华为 P30 Pro	iPhone 11
分辨率	3016×4032	3000×3000	2976×2976	4032×2268
检测率（%）	80	100	100	100
准确率（%）	89.355	94.785	93.681	97.100

VII. 结论

本文提出了一种新型的整体美学二维条码方案，名为 OAcode。该方案不含位置检测图案，却具备完整美学二维条码应有的全部功能。实验结果表明，在特定的屏幕与摄像头距离和角度下，OAcode 能够快速检测和解调。此外，借助更好的设备和参数，OAcode 的性能还可以进一步提升。在未来的工作中，我们将探索 OAcode 在文档打印中的应用，并基于 OAcode 框架研究一种抗裁剪二维条码。

参考资料

[1] E. Ohbuchi、H. Hanaizumi 和 L. A. Hock，《使用手机摄像设备的条码阅读器》，载于*2004*年国际 *Cyberworlds* 会议，2004年，第260–265页。
[2] M. S. Hossain、X. Zhou 和 M. F. Rahman，《基于感知流考察二维码对购买意愿和客户满意度的影响》，《国际工程商业管理杂志》，第10卷，页码1847979018812323，2018年。 [在线]。网址：https://doi.org/10 1177 1847979018812323 。/ T. Cata、P. S. Patel 和 T.
[3] Sakaguchi，《二维码：移动营销的新机遇》，《移动技术、知识与社会杂志》，第2013卷，页码1，2013年。[4] S. Okazaki、H. Li 和 M. Hirose，《移动推广中二维码应用的基准研究：日本的三项研究》，《广告研究杂志》，第52卷，第1期，第102–117页，2012年。

[5] 《二维码营销研究：效果、采纳与应用案例》，2022年。 [在线]。网址：https://www.qrcodechimp.com/qr-code-marketing-research/ [6] X. Min、K. Gu、G. Zhai、X. Yang、W. Zhang、P. Le Callet 和 C. W. Chen，《屏幕内容质量评估：概述、基准与展望》，ACM计算调查（CSUR），第54卷，36，2021年9月，第1期，第–页。[7] K. Ma、S. Das、Z. Shu 和 D. Samaras，《从真实场景中的文档学习以改进文档去扭曲》，载于 ACM SIGGRAPH 2022会议论文集，2022年，第1–9页。[8] A. J. Sellen 和 R. H. Harper，《无纸化办公的神话》。MIT出版社，2003年。[9] G. J. Garateguy、G. R. Arce、D. L. Lau 和 O. P. Villarreal，《二维码图像：二维码中的优化图像嵌入》，IEEE图像处理汇刊，第23卷，第7期，第2842–2853页，2014年。[10] W. Huang 和 W. H. Mow，《PiCode：嵌入图片的二维条码；Vicode：嵌入视频的三维条形码》，载于第19届年度国际移动计算与网络会议论文集，2013年，第139–142页。[11] C. Chen、B. Zhou 和 W. H. Mow，《RA Code：一种适用于分辨率受限应用的稳健美观编码》，IEEE视频技术电路与系统汇刊，第28卷，第11期，第3300–3312页，2018年。[12] C. Chen、W. Huang、L. Zhang 和 W. H. Mow，《通过蓝色通道嵌入实现稳健且不显眼的显示器到摄像头通信》，IEEE图像处理汇刊，第28卷，第1期，第156–169页，2019年。[13] 《QRcode》，2020年。 [在线]。网址：https://www.qrcode.com/zh/index. html[14] 《Data Matrix》，2020年。 [在线]。网址：https://en.wikipedia.org/wiki/Data Matrix_[15] G. Zhai 和 X. Min，《感知图像质量评估：综述》，中国科学：信息科学，第63卷，第11期，第1–52页，2020年。[16] X. Min、K. Gu、G. Zhai、J. Liu、X. Yang 和 C. W. Chen，《基于伪参考图像的盲质量评估》，IEEE多媒体汇刊，第20卷，第8期，第2049–2062页，2017年。[17] X. Min、G. Zhai、K. Gu、Y. Liu 和 X. Yang，《通过失真加剧进行盲图像质量估计》，IEEE广播汇刊，第64卷，第2期，第508–517页，2018年。[18] X. Min、G. Zhai、J. Zhou、M. C. Farias 和 A. C. Bovik，《视听信号主观与客观质量评估研究》，IEEE图像处理汇刊，第29卷，第6054–6068页，2020年。[19] X. Min、K. Ma、K. Gu、G. Zhai、Z. Wang 和 W. Lin，《自然、图形及屏幕内容图像的统一盲质量评估》，IEEE图像处理汇刊，第26卷，第11期，第5462–5474页，2017年。[20] X. Min、K. Gu、G. Zhai、M. Hu 和 X. Yang，《适用于自然场景和屏幕内容图像的显著性诱导简化参考质量指数》，信号处理，第145卷，第127–136页，2018年。[21] R. Cox，《Qartcodes》，2012年4月。 [在线]。网址：http://research.swtch.com/qart [22] H.-K. Chu、C.-S. Chang、R.-R. Lee 和 N. J. Mitra，《半色调二维码》，ACM图形学汇刊（TOG），第32卷，第6期，第1–8页，2013年。[23] S. Lin、M. Hu、C. Lee 和 T. Lee，《高质量视觉内容的高效二维码美化》，IEEE多媒体汇刊，第17卷，第9期，第1515–1524页，2015年。[24] N. Aliva、U. Peled 和 F. Itamar，《Visualead》，2020年。 [在线]。网址：https://www.visualead.com/ [25] Z. Baharav 和 R. Kakarala，《视觉显著二维码：图像融合与统计分析》，载于2013年IEEE国际多媒体与博览会会议（ICME），2013年，第1–6页。[26] Y. Lin、Y. Chang 和 J. Wu，《基于外观的二维码美化器》，IEEE多媒体汇刊，第15卷，第8期，第2198–2207页，2013年。[27] M. Xu、H. Su、Y. Li、X. Li、J. Liao、J. Niu、P. Lv 和 B. Zhou，《风格化美学二维码》，IEEE多媒体汇刊，第21卷，第8期，第1960–1970页，2019年。[28] Z. Yang、Y. Bao、C. Luo、X. Zhao、S. Zhu、C. Peng、Y. Liu 和 X. Wang，《Artcode：在任意图像中保留艺术与编码》，载于2016年ACM泛在与普适计算国际联合会议论文集，2016年，第904–915页。[29] J.-C. Liu 和 H.-A. Shieh，《面向移动应用：利用感知整形水印实现带有视觉信息的二维条形码》，光学工程，第50卷，第1期，页码017002，2011年。[30] J. Jia、G. Zhai、J. Zhang、Z. Gao、Z. Zhu、X. Min、X. Yang 和 G. Guo，《Embdn：适用于复杂环境的高效多类别条形码检测网络》，IEEE物联网期刊，第6卷，第6期，第 9919–9933 页，2019年。 [31] J. Jia、G. Zhai、P. Ren、J. Zhang、Z. Gao、X. Min 和 X. Yang，“Tiny-bdn：一种高效紧凑的条码检测网络”，IEEE信号处理精选主题期刊，第14卷，699，2020 4，688期，页码 – 。[32] J. Zhang、X. Min、J. Jia、Z. Zhu、J. Wang 和 G. Zhai，“复杂环境下多类别条码的精细定位与抗畸变检测”，Multim. Tools Appl.，第80，11，16 153 16 172, 卷，期，页2021 [ ] 10 1007 11042 019 08578 码 – 。在线。可访问：https://doi.org/。/s - - -x [33] D. W. Inc. 和 Elkhart，“安全边距”，2020年。 [在线]。可访问：https://www.qrcode.com/en/howto/code.html [34] S. Kang、S. D. Kim 和 M. Kim，“针对镜头畸变和压缩伪影的相机标定：基于结构信息的鲁棒角点提取”，IEEE Access，第9卷，页码151 037–151 048，2021年。[35] F. A. Petitcolas、R. J. Anderson 和 M. G. Kuhn，“对版权标记系统的攻击”，载于《国际信息隐藏研讨会》。Springer，1998年，页码218–238。[36] F. A. Petitcolas，“水印方案评估”，IEEE Signal Process. Mag，第17卷，第5期，页码58–64，2000年。[37] F. A. P. Petitcolas、R. J. Anderson 和 M. G. Kuhn，“信息隐藏——综述”，IEEE会刊，第87卷，第7期，页码1062–1078，1999年。[38] C. I. Podilchuk 和 E. J. Delp，“数字水印：算法与应用”，IEEE Signal Process. Mag，第18卷，46，2001 4，33期，页码 – 。[39] H. Fang、W. Zhang、Z. Ma、H. Zhou、S. Sun、H. Cui 和 N. Yu，“用于底纹文档的抗相机拍摄水印方案”，IEEE视频技术电路与系统汇刊，2019年。[40] H. Fang、W. Zhang、H. Zhou、H. Cui 和 N. Yu，“抗屏幕拍摄水印”，IEEE Trans. Inf. Forensics Security，第14卷，第6期，页码1403–1418，2018年。[41] A. Cheddad、J. Condell、K. Curran 和 P. Mc Kevitt，“数字图像隐写：当前方法的综述与分析”，信号处理，第90卷，第3期，页码727–752，2010年。 [在线]。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168409003648 [42] N. Provos 和 P. Honeyman，“藏猫猫：隐写术简介”，IEEE安全与隐私，第1卷，第3期，页码32–44，2003年。[43] N. Subramanian、O. Elharrouss、S. Al-Maadeed 和 A. Bouridane，“图像隐写：最新进展综述”，IEEE Access，第9卷，页码23 409–234 423，2021年。[44] M. Tancik、B. Mildenhall 和 R. Ng，“StegaStamp：实体照片中的隐形超链接”，载于IEEE计算机视觉与模式识别会议（CVPR），2020年。[45] H. Fang、D. Chen、F. Wang、Z. Ma、H. Liu、W. Zhou、W. Zhang 和 N. Yu，“Tera：具有透明度、效率、鲁棒性和适应性的屏幕到相机图像码”，IEEE多媒体汇刊，第24卷，页码955–967，2022年。[46] J. Jia、Z. Gao、K. Chen、M. Hu、X. Min、G. Zhai 和 X. Yang，“Rihoop：离线和在线照片中的鲁棒隐形超链接”，IEEE控制论汇刊，第52卷，第7期，页码7094–7106，2022年。[47] J. Jia、Z. Gao、D. Zhu、X. Min、G. Zhai 和 X. Yang，“为离线到在线摄影中的隐藏码学习隐形标记”，载于IEEE/CVF计算机视觉与模式识别会议论文集，2022年，页码2273–2282。[48] Z. Ma、W. Zhang、H. Fang、X. Dong、L. Geng 和 N. Yu，“基于对称性的局部几何畸变鲁棒水印方案”，IEEE视频技术电路与系统汇刊，页码1–1，2021年。[49] R. Pickholtz、D. Schilling 和 L. Milstein，“扩频通信理论——教程”，IEEE通信汇刊，第30卷，第5期，页码855–884，1982年。[50] T. Chapman、E. Larsson、P. von Wrycza、E. Dahlman、S. Parkvall 和 J. Sköld，“第3章——CDMA传输原理”，载于《HSPA Evolution》。牛津：Academic Press，2015年，页码35–48。 [在线]。可访问：https: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008099969200003X [51] J. S. Lim，《二维信号与图像处理》。新泽西州恩格尔伍德克利夫斯，Prentice Hall，1990年，第548页，方程9.26、9.27和9.29。[52] “BelgaLogos数据集”，2014年3月。 [在线]。可访问：http://www-sop.inria.fr/members/Alexis.Joly/BelgaLogos/BelgaLogos.html [53] “CVG-UGR图像数据库”，2014年3月。 [在线]。可访问：http: // decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/