

彭程, 刘佳鑫, 杨海根, 等. 蜻蜓复眼压缩感知视觉隐私保护方法研究[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(2): 24-28. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24050901

蜻蜓复眼压缩感知视觉隐私保护方法研究

彭程, 刘佳鑫, 杨海根, 孙宁

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 针对现有智能视频监控系统中图像或视频的识别任务一般要求其视觉可见, 忽略了视觉隐私保护的问题。本文通过模拟蜻蜓复眼小眼梯度变化特点与压缩感知理论相结合, 提出了蜻蜓视觉仿生编码模型, 实现对场景采样前的视觉隐私保护。该方法可以模拟类蜻蜓复眼视觉特点, 很好地实现视觉感知屏蔽, 同时编码后的数据能够有效地进行后续的智能识别应用。实验证明, 该方法在有效识别人脸与行为的同时, 具有良好的准确性与视觉隐私保护特性。本研究有利于改善视觉隐私保护, 同时也为隐私保护下的智能应用提供了探索与积累。

关键词: 隐私保护; 蜻蜓复眼; 压缩感知; 仿生视觉

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)02-0024-05

Research on dragonfly compound eye compressed sensing visual privacy protection method

PENG Cheng, LIU Jixin, YANG Haigen, SUN Ning

(School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at the existing intelligent video surveillance system in which the recognition task of images or videos generally requires their visual visibility, the problem of visual privacy protection is ignored. This paper proposes a dragonfly visual bionic coding model by simulating the characteristics of dragonfly compound ommatidia gradient changes combined with the theory of Compressed Sensing to achieve visual privacy protection before scene sampling. The method can simulate the visual characteristics of dragonfly-like compound eyes and well realize visual perception shielding, while the coded data can be effectively used for subsequent intelligent recognition applications. The experimental results show that the method has good accuracy and visual privacy-preserving properties while effectively recognizing faces and behaviors. In a word, this study is not only helpful for improving visual privacy protection, but also provides exploration and accumulation for intelligent applications under privacy protection.

Key words: privacy preserving; dragonfly compound eye; compressed sensing; bionic vision

0 引言

目前绝大多数智能视频监控系统都是对现实生活场景进行完全采样^[1-2], 得到高清的监控视频或图像后, 进行行为识别等智能应用。这的确有利于提高识别的准确率, 但是可能在数据处理过程中造成视觉隐私泄露的问题。

针对目前对视觉敏感信息可能出现的泄露问题, 研究者提出了多种有效的视觉隐私保护处理技术。具体可分为以下几种:

(1) 面部模糊^[3-4], 实现面部隐私保护。然而,

仅仅保护人脸数据的方法在保护视觉隐私方面已经被证明是不够的, 因为场景中可能包含一些私人物品, 如银行卡和订单等。

(2) 加密处理^[5-7], 例如混沌加密方案等。然而, 图像中的有用信息也会被干扰, 这使得识别主体的行为变得困难。此外, 一旦密钥泄露, 就可以很容易地重建编码的视频和图像。

(3) 降低图像的分辨率^[8], 实现低分辨率图像, 达到视觉隐私保护的效果, 是当下主流的视觉隐私保护技术^[9-12]。但往往涉及直接对高质量图像进行降采样以生成低分辨率图像。此外, 降采样的低

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3300300)。

作者简介: 彭程(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 仿生视觉, 视觉隐私保护, 图像处理。

通信作者: 刘佳鑫(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 压缩感知, 图像处理和识别。Email: liujixin@njupt.edu.cn。

收稿日期: 2024-05-09

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

分辨率图像会丢失信息,影响后续处理。上述的视觉隐私保护处理技术存在一定的缺点。首先,难以在编码的图像上进行智能识别应用研究;其次,编码图像可能泄露场景内的私人信息,并且会导致信息的过度丢失,导致识别困难。

为此,本文对蜻蜓复眼压缩感知的视觉隐私保护方法进行研究。本文首先建立了蜻蜓复眼的小眼空间分布模型。然后将其映射为蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵,采样实现类蜻蜓复眼视觉。同时引入广泛用于图像加密隐私保护的压缩感知采样机制^[13],增强蜻蜓视觉仿生编码的加密性与使加密图像不可重构,实现采样前的视觉隐私保护,同时又能高保真地保存信息用于后续智能应用。具体编码系统框架如图 1 所示。

文的仿生视觉编码模型的设计灵感来自自然对应物的独特设计。

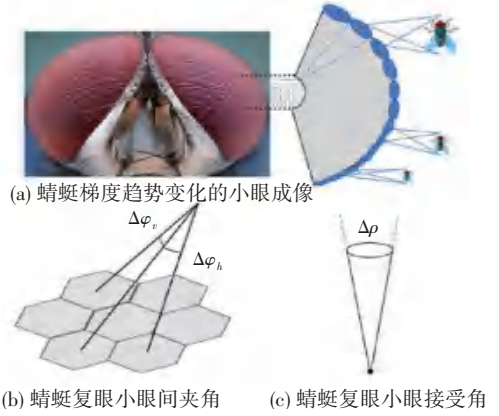


图 2 蜻蜓复眼结构示意图

Fig. 2 Structure of dragonfly compound eye

为了实现类蜻蜓复眼视觉^[16],本文建立了蜻蜓复眼小眼空间分布模型^[17]。蜻蜓的小眼空间分布模型由 3 个二次方程实现了每个区域小眼的空间位置变化。具体公式如下:

$$EI = +\alpha_1 \cdot EI^2 - \beta_1 \cdot EI + c_1 \quad (1)$$

$$A_{Z_{neg}} = -\alpha_2 \cdot A_{Z_{neg}}^2 - \beta_2 \cdot A_{Z_{neg}} + c_2 \quad (2)$$

$$A_{Z_{pos}} = +\alpha_3 \cdot A_{Z_{pos}}^2 - \beta_3 \cdot A_{Z_{pos}} + c_3 \quad (3)$$

其中, EI 表示间距的高度变化, $A_{Z_{neg}}$ 与 $A_{Z_{pos}}$ 分别表示间距的正负方位角的变化。为了将得到的小眼空间分布模型应用于图像,本文通过不同映射函数把小眼空间分布模型中的每个小眼位置映射到图像像素索引上,由此即有效地将图片采样为蜻蜓复眼视觉仿生编码图像,得到了 4 种模式的蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵 Φ , 具体如图 3 所示。

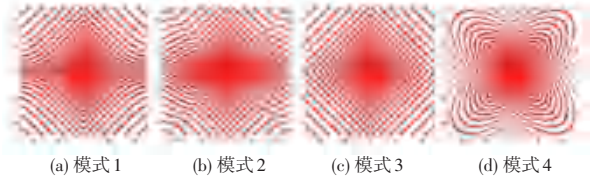


图 3 4 种蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵

Fig. 3 Sampling matrix for spatial resolution of dragonfly compound eyes

同时,为了增强蜻蜓仿生视觉编码的加密性与使加密图像不可重构,研究与压缩感知编码机制进行了结合。根据本团队前期工作^[18],压缩感知在投影域中获取、传输与存储图像和视频序列是计算安全的,在这种意义上,只有具备观测矩阵的先验知识才能实现压缩图像的解码重构。具体编码方式如下:

$$y = \Phi \cdot \Psi \cdot x \quad (4)$$

其中, x 表示原始图像; Ψ 表示观测矩阵; Φ 表示蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵; y 表示仿生编码

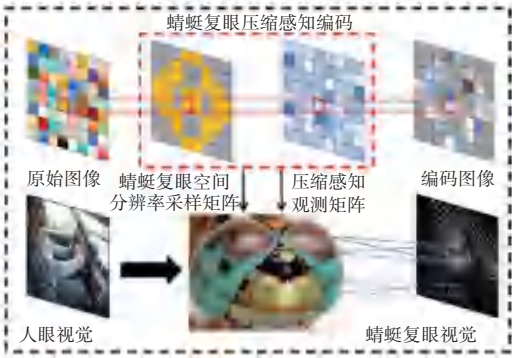


图 1 系统框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system framework

1 本文视觉隐私保护方法

1.1 蜻蜓视觉仿生编码模型设计

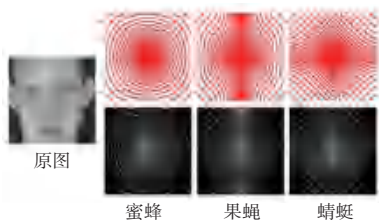
蜻蜓是昆虫界的顶级捕食者,拥有约 30 000 个小眼数目,具有独特的复眼结构。在图 2(a)中,蜻蜓复眼的背侧和腹侧区域连续分布着大量大小呈梯度趋势的小眼^[14],有丰富的渐变趋势,使蜻蜓在不同方向上有不同的视觉分辨率。这对视觉隐私保护方面是一大吸引力。研究中拟将对视觉数据进行分辨率差异化采样,实现人类视觉感知屏蔽。与视觉隐私保护最相关的是蜻蜓复眼视觉的空间分辨率^[15],拟将由眼间角 $\Delta\varphi$ 和接受角 $\Delta\rho$ 决定。在图 2(b)中,眼间角 $\Delta\varphi$ 分为水平方向小眼间夹角 $\Delta\varphi_h$ 与垂直方向的小眼间夹角 $\Delta\varphi_v$, 蜻蜓的眼间角 $\Delta\varphi$ 在 $0.3^\circ \sim 0.5^\circ$ 之间^[15],其中垂直方向的小眼间夹角 $\Delta\varphi_v$ 在复眼中心最小,往边缘方向递增,因此复眼中心具有较高的视觉分辨率。而单个小眼的视野与接受角 $\Delta\rho$ 有关,蜻蜓的接受角 $\Delta\rho$ 大约在 $1.31^\circ \sim 1.46^\circ$ 之间,所以蜻蜓复眼具有较大的视野范围。本

后的图像,大小都为 $N \times N$;“ \cdot ”表示矩阵的点乘运算。具体来说是将蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵加入到压缩感知编码机制中,对压缩的图像进行蜻蜓复眼空间分辨率采样实现类蜻蜓复眼视觉。同时压缩感知投影计算方案适合用于在摄像头源头端进行光编码^[18],即可以利用投影计算直接产生压缩和安全的图像或视频帧数据,而无需采样整个图像。

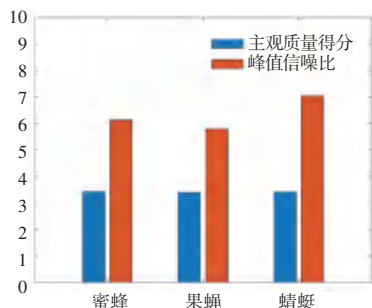
本文中比较了目前典型的复眼结构:蜜蜂、果蝇和蜻蜓^[19],昆虫复眼的相关空间分辨率采样矩阵与其编码效果如图4(a)所示,这表明不同复眼仿生学编码的图像存在一些差异。本文以主观质量得分和峰值信噪比为评价指标,评估其隐私保护水平及其编码中保留的信息量,结果如图4(b)所示。结果显示三者的主观质量得分接近,这表明编码的视觉隐私保护效果相近。但是,蜻蜓视觉仿生编码保留了较多的信息量,这有利于编码图像后续的智能应用,所以本文选用蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵构建蜻蜓视觉仿生编码模型。同时本文将采样率 R 的计算方法定义为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Phi(i, j)}{N \times N} \quad (5)$$

通过调整 Φ 参数得到采样率为 (30%, 26%, 22%, 18%, 14%) 的蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵。



(a) 典型昆虫复眼空间分辨率采样矩阵编码效果比较



(b) 典型昆虫复眼空间分辨率采样矩阵隐私保护水平与信息量比较

图4 典型复眼空间分辨率采样矩阵性能的比较

Fig. 4 Comparison of sampling matrix performance

1.2 压缩感知观测矩阵设计

常规的压缩感知观测矩阵设计中存在负值元素,如果直接用于本文的蜻蜓视觉仿生编码模型中,可能会在编码的过程中出现像素点相互抵消的情

况,使压缩感知编码图像不能基于原始图像数据实现最佳信息表征,对编码后图像的智能识别精度产生影响。另一方面,常规的压缩感知观测矩阵往往要求原始信号是已知的,基于元胞自动机生成,而在实际应用场景中通常处理的是未知信号。根据本团队的前期工作^[18],在多层压缩感知采样编码中,设计了一种观测矩阵,适用于实际应用场景,并且当编码图像应用于智能应用时,仍具有高保真度。因此,本文采用修正非负高斯随机观测矩阵构成蜻蜓视觉仿生编码模型,具体原理如下:

$$\Psi' = \begin{cases} \frac{\Psi - \min(\Psi)}{\max(\Psi)}, & \text{if } \min(\Psi) < 0 \\ \Psi, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中, Ψ 表示高斯随机测量矩阵。修正后的非负高斯随机观测矩阵仍然具有高斯随机矩阵的随机性和高斯分布特征,该矩阵解决了高斯随机观测矩阵中存在负数、且当对信号进行观测时可能会导致信号特征丢失问题。

2 实验结果与分析

本小节对本文提出的编码性能进行测试,重点聚焦在3个问题,即:修正非负高斯随机观测矩阵的有效性、蜻蜓视觉仿生编码的处理效果与蜻蜓视觉仿生编码在智能应用中的可行性。针对上述问题,本小节将在公开的 ORL 人脸数据集与 AUCD2^[20] 分心驾驶员数据集中进行相应的实验处理验证。

2.1 修正非负高斯随机观测矩阵的有效性

为了验证修正非负高斯随机观测矩阵在本文蜻蜓视觉仿生编码模型中的有效性,本环节将 ORL 人脸数据集分别输入以修正非负高斯随机观测矩阵、高斯随机观测矩阵、伯努利随机观测矩阵、稀疏随机观测矩阵与托普利兹随机观测矩阵作为观测矩阵的蜻蜓视觉仿生编码模型中,复眼空间分辨率采样矩阵选用模式1,依次进行采样率为30%、26%、22%、18%、14%的蜻蜓视觉仿生编码。本文采用基于稀疏表示的分类 SRC 算法对不同采样率下不同观测矩阵的 ORL 人脸数据集进行人脸识别实验^[21]。训练与测试比为8:2,并通过五折交叉验证实验重复100次取人脸识别精度平均值作为结果。具体实验结果见表1。

实验结果表明,修正非负高斯随机观测矩阵对比其他4种压缩感知常用的观测矩阵在蜻蜓视觉仿生编码模型中信息保真度最好,在 SRC 人脸识别实

验中的识别精度均在 91% 以上, 而其他 4 种常见的观测矩阵的识别精度较低, 不适用于实际智能识别应用场景, 因此, 本文选用修正非负高斯随机观测矩阵作为蜻蜓视觉仿生编码模型中的观测矩阵。

表 1 5 种观测矩阵下模式 1 的蜻蜓视觉仿生编码模型 SRC 算法人脸识别精度

Table 1 Face recognition accuracy of SRC algorithm of dragonfly visual bionic coding model for mode 1 under 5 observation matrices %

采样率	修正非负高斯随机观测矩阵	高斯随机观测矩阵	伯努利随机观测矩阵	稀疏随机观测矩阵	托普利兹随机观测矩阵
30	93.33	3.74	3.63	9.65	3.90
26	92.71	2.86	2.98	8.89	2.69
22	92.50	2.91	2.80	7.54	3.37
18	92.71	1.83	2.71	7.99	2.18
14	91.25	1.62	1.84	6.45	2.11

2.2 蜻蜓视觉仿生编码的处理效果

为了验证蜻蜓视觉仿生编码的视觉隐私保护效果, 本环节选取了 3 种经典视觉降质方法与本文方法进行对比实验, 具体包括: 高斯噪声、离焦模糊、运动模糊与本文方法, 如图 5(a) 所示。本团队前期研究的 VPPLE (Visual Privacy Preserving Level Evaluation) [19] 是当前相关技术中较为适合视觉隐私保护编码的质量评价工具。根据前期研究经验, 对上述方法从准确性、单调性和一致性等 3 个方面, 分别取其评价指标 PLCC (Pearson Linear Correlation Coefficient)、KROCC (Kendall Rank Order Correlation Coefficient)、RMSE (Root Mean Square Error) 进行比较, 结果见表 2。

表 2 VPPLE 方法下不同处理方法的评价结果

Table 2 Evaluation results of different treatments under VPPLE

评价指标	高斯噪声	离焦模糊	运动模糊	本文方法
PLCC	0.616 9	0.661 7	0.686 9	0.956 6
KROCC	0.432 9	0.495 3	0.510 1	0.783 2
RMSE	0.762 8	0.424 8	0.445 2	0.321 5

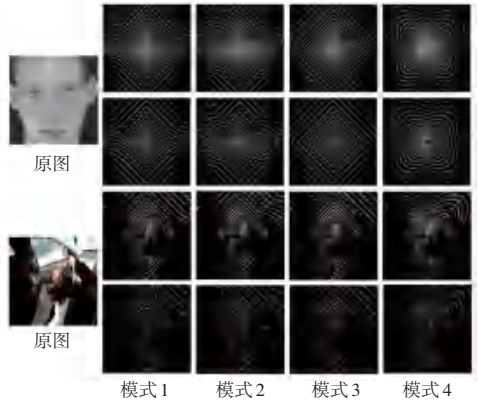
其中准确性方面, PLCC 的取值在视觉隐私保护中从 -1 到 1, 无论正负, 越远离 0 越好; 单调性方面, KROCC 在 0 到 1 之间, 越大表示一致性越好; RMSE 越接近 0 越好。实验对比结果表明, 本文方法在准确性、单调性和一致性方面都有着显著优势。

进一步选取了 2 种环境下的处理效果: 简单环境下的人脸图像与复杂环境下的驾驶员图像, 分别进行不同采样率下的编码, 具体效果如图 5(b) 所示。随着采样率的降低, 编码图像的质量与视觉可见性不断下降, 视觉隐私保护效果越显著。同时可以得出, 本文蜻蜓视觉仿生编码在应对不同复杂度环境时, 图像中的信息均可以被很好地屏蔽起来, 未产生视觉信息

泄露情况, 具有良好的视觉隐私保护特性。



(a) 本研究所使用方法的直观示例



(b) 不同复杂度环境下本文计算处理效果

图 5 视觉隐私保护效果

Fig. 5 Visual privacy protection effects

2.3 蜻蜓视觉仿生编码可行性分析

为了验证蜻蜓视觉仿生编码在后续智能应用中的可行性, 本环节在 2 个应用场景中进行实验分析。即: 人脸识别实验与分心驾驶员识别实验。

本文采用基于稀疏表示的分类 SRC 算法对不同采样率下不同模式的复眼空间分辨率采样矩阵的 ORL 人脸数据集进行人脸识别实验, 实验结果见表 3。

表 3 编码保护的图像人脸识别性能

Table 3 Performance of face recognition for coded images %

采样率	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
30	93.33	92.08	93.13	92.08
26	92.71	92.08	91.67	91.46
22	92.50	92.92	90.61	91.88
18	92.71	92.71	92.50	91.67
14	91.25	91.04	92.50	91.04

实验结果表明, 本文 4 种蜻蜓复眼采样矩阵都有高于 91% 的较好的识别性能。此外, 从编码图像与对应的识别率可以初步看出本文编码的效果: 编码后的图像具有较好的人眼视觉屏蔽的隐私保护特性, 在此基础上还有一定的识别性能, 在人脸识别的智能应用上具有一定的可行性。其中, 模式 1 的识别性能最优。

本文使用 SKResNeXt50_32x4d [22] 卷积网络在 AUCD2 分心驾驶员数据集上进行实验验证, 并选取上轮实验效果较好的模式 1 采样矩阵进行 5 种采样率采样。训练图像: 测试图像为 8 : 2, 随机分割图像 10 次, 并报告平均精度。具体识别率与采样率变化趋势实验结果如图 6 所示。

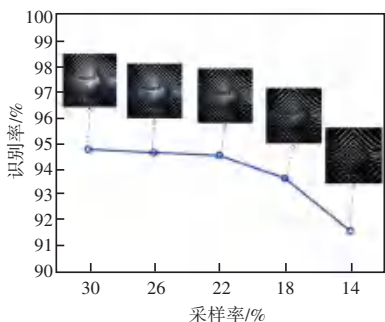


图6 编码保护图像的分心驾驶员识别性能

Fig. 6 Distracted driver recognition performance for coded images

实验结果显示,编码后的数据都有高于91%的较好的识别性能,证明本模型具有良好的保真度与可行性。结合编码模型图像的保密性结果分析,当采样率低于22%时,视觉隐私保护层度高,但是模型识别率低,不满足识别性能要求。采样率高于22%时,虽然识别率会提高,但是不满足视觉隐私保护的需求。而在采样率为22%时,分心驾驶员数据集仍具有较好的视觉隐私保护性能,对人眼视觉有一定的视觉屏蔽效果。在此隐私保护度的基础上保留较多的信息量,卷积网络中的识别结果仍能达到较高的水平,在采样率22%时,本文方法实现了视觉隐私保护与分心驾驶员智能应用之间的平衡。

3 结束语

本文针对现有智能视频监控系统中数据处理过程中存在的隐私泄露问题,提出了一种蜻蜓视觉压缩感知视觉隐私保护方法,以解决智能应用与个人隐私保护之间的矛盾。首先,根据蜻蜓复眼小眼梯度变化的特点与小眼空间分布模型,映射像素分布得到蜻蜓复眼空间分辨率采样矩阵。然后,为了增强该编码的加密性能与不可重构,结合压缩感知编码机制实现了类蜻蜓复眼视觉采样前的视觉屏蔽效果。同时还具有高保真性,在隐私保护的基础上还能够应用于智能识别应用。但是本文所提出的方法还存在一些不足,可以考虑更多的复眼参数,以实现更佳的蜻蜓复眼视觉空间分辨率,提高仿生视觉效果。同时本文方法在其他隐私相关场景的应用,是本文研究团队未来的科研突破方向。

参考文献

[1] 秦春林,孙宝民,石建刚. 基于视频识别技术的心盘螺栓自动紧固研究[J]. 自动化技术与应用,2023,42(7):166-169.
 [2] 王彦博,张剑书,孙新元. 基于机器视觉的疲劳驾驶检测算法研究[J]. 智能计算机与应用,2023,13(6):130-132.
 [3] YUAN Lin, LIANG Kai, PU Xiao, et al. Invertible image obfuscation for facial privacy protection via secure flow[J]. IEEE

Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2024,33: 3880-3892.
 [4] ZHANG Yushu, JI Junhao, WEN Wenyong, et al. Understanding visual privacy protection: A generalized framework with an instance on facial privacy[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2024,19: 5046-5059.
 [5] ZHU Shenli, DENG Xiaoheng, ZHANG Wendong, et al. Image encryption scheme based on newly designed chaotic map and parallel DNA coding[J]. Mathematics, 2023, 11: 231.
 [6] 王梦生,孙先赫,马宏斌. DNA运算与超混沌系统新型图像加密算法[J]. 智能计算机与应用,2023,13(5):90-97.
 [7] LIANG Qin, ZHU Congxu. A new one-dimensional chaotic map for image encryption scheme based on random DNA coding[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 160: 109033.
 [8] 洪俊,刘星璇,董航. 基于中低分辨率卫星影像中舰船目标识别方法[J]. 计算机仿真,2024,41(4):13-19.
 [9] BAI Yucai, ZOU Qin, CHEN Xieyuanli, et al. Extreme low-resolution action recognition with confident spatial-temporal attention transfer[J]. International Journal of Computer Vision, 2023, 131(6): 1550-1565.
 [10] 刘信鑫,韩光,杨海根,等. 在线教学视觉隐私保护学生专注度监测研究[J]. 智能计算机与应用,2022,12(11):1-8.
 [11] LIU Jixin, TANG Zheng, SUN Ning, et al. Visual privacy-preserving level evaluation for multilayer compressed sensing model using contrast and salient structural features[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 89: 115996.
 [12] 李云红,刘杏瑞,谢蓉蓉,等. 基于超分辨重建和公共特征子空间的低分辨率人脸识别[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2023,53(2):241-247.
 [13] 匡琳,邹孟雷,温文媛. 融合2D压缩感知的缩略图格式保留加密隐私保护[J]. 中国图象图形学报,2023,28(3):666-679.
 [14] LABHAR T, NILSSON D E. The dorsal eye of the dragonfly: specializations for prey detection against the blue sky[J]. Journal of Comparative Physiology A, 1995, 176: 437-453.
 [15] LAUGHLIN S, MCGINNESS S. The structures of dorsal and ventral regions of a dragonfly retina[J]. Cell and Tissue Research, 1978, 188: 427-447.
 [16] 李文元,高琦,王红会,等. 昆虫复眼视觉系统的计算机模拟[J]. 天津大学学报,2000, 33(2):259-261.
 [17] GIGER A D, SRINIVASAN M V. Honeybee vision: analysis of orientation and colour in the lateral, dorsal and ventral fields of view[J]. Journal of Experimental Biology, 1997, 200(8): 1271-1280.
 [18] 汤正,刘信鑫,孙宁,等. 面向多层压缩感知图像的内容隐私保护度评价方法[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2020,48(2):58-68.
 [19] LIU Jixin, WANG Kai, YANG Haigen, et al. Visual privacy-preserving coding for video intelligence applications: A compressed sensing mechanism via bee-eye bionic vision[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2023,16(3): 1186 - 1197.
 [20] ALOTAIBI M, ALOTAIBI B. Distracted driver classification using deep learning[J]. Signal, Image and Video Processing, 2020, 14(3): 617-624.
 [21] 韦旭勤. 基于稀疏表示的人脸识别算法研究[J]. 信息与电脑(理论版),2021,33(16):70-73.
 [22] LI Xiang, WANG Wenhai, HU Xiaolin, et al. Selective kernel networks[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 510-519.