

## 图像拼接篡改的自动色温距离分类检验方法

孙鹏<sup>1,2,3</sup> 郎宇博<sup>1</sup> 樊舒<sup>1</sup> 沈喆<sup>4,5</sup> 彭思龙<sup>2</sup> 刘磊<sup>1</sup>

**摘要** 拼接篡改是一类常见的图像伪造手段, 现有取证方法难以实现图像中拼接篡改区域的自动检测与精确定位, 导致拼接篡改伪造图像的取证长期依赖人工经验. 基于图像中原始区域与拼接篡改区域所反映的光源色温的差异性, 提出一种自动色温距离阈值分类的图像拼接篡改检测与定位方法. 首先, 变换待检验图像至 YCbCr 色彩空间, 并按照 Grid-based 方式结构化分解为大小的子图像块; 然后, 利用自动白平衡 (Automatic white balance, AWB) 中的白点检测原理对每一个子图像块进行色温估计, 计算子图像块与参考区域之间的色温距离; 最后, 采用最大类间方差法自适应地求出色温距离分类的最佳阈值, 对子图像块进行分类标注, 实现了图像拼接篡改区域的自动检测与精确定位. 实验表明, 该方法能够实现图像拼接篡改区域的自动检测与定位, 具有较高的量化检测精度.

**关键词** 拼接篡改, 图像取证, 色温估计, 色温距离, 自动阈值

**引用格式** 孙鹏, 郎宇博, 樊舒, 沈喆, 彭思龙, 刘磊. 图像拼接篡改的自动色温距离分类检验方法. 自动化学报, 2018, 44(7): 1321–1332

**DOI** 10.16383/j.aas.2017.c170267

## Detection of Image Splicing Manipulation by Automated Classification of Color Temperature Distance

SUN Peng<sup>1,2,3</sup> LANG Yu-Bo<sup>1</sup> FAN Shu<sup>1</sup> SHEN Zhe<sup>4,5</sup> PENG Si-Long<sup>2</sup> LIU Lei<sup>1</sup>

**Abstract** Splicing is a common types of tampering in image manipulation. As many authentication methods cannot detect and localize the manipulated area automatically in splicing images, authentication of splicing image has depended on human experience for a long time. In this paper, considering the inconsistency of color temperature between original area and splicing area, we propose an automated distance threshold classification method for splicing image detection and manipulation localization by color temperature estimation. At first, we transform suspicious image into YCbCr color space and divide it into blocks with grid-based manner. Then, we estimate color temperature of each block using automatic white balance (AWB) theory, and calculate Euclidean distance between reference area and suspicious area. Finally, we localize the splicing area with an automated estimated optimal threshold of color temperature distance. Experiments indicate that our method can detect splicing images and localize splicing area effectively and automatically with a quantitative result.

**Key words** Splicing image, image authentication, color temperature estimation, distance of color temperature estimation, automated threshold

**Citation** Sun Peng, Lang Yu-Bo, Fan Shu, Shen Zhe, Peng Si-Long, Liu Lei. Detection of image splicing manipulation by automated classification of color temperature distance. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(7): 1321–1332

收稿日期 2017-05-16 录用日期 2017-12-23  
Manuscript received May 16, 2017; accepted December 23, 2017  
国家自然科学基金 (61307016), 现场物证溯源技术国家工程实验室开放课题 (2017NELKFKT09), 中央高校基本科研业务费项目 (D2017021) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61307016), National Engineering Laboratory of Evidence Traceability Technology (2017NELKFKT09), Fundamental Research Funds for the Central Universities (D2017021)

本文责任编辑 桑农  
Recommended by Associate Editor SANG Nong

1. 中国刑事警察学院 沈阳 110035 2. 中国科学院自动化研究所 北京 100190 3. 现场物证溯源技术国家工程实验室 北京 100038 4. 辽宁石油化工大学 抚顺 113001 5. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016

1. Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035 2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 3. National Engineering Laboratory of Evidence Traceability Technology, Beijing 100038 4. Liaoning

图像作为一类重要的视觉媒介, 具有记录、存储与传递影像信息的功能, 被广泛地用于刑事侦查与法庭取证过程中. 然而, 随着各类数字图像获取设备的普及, 人们可以方便地拍摄大量的数字图像, 并使用 Photoshop 等专业软件对得到的数字图像进行编辑、处理甚至恣意的篡改<sup>[1]</sup>. 为了确保司法审判中所使用的图像的真实性与客观性, 修订之后的中华人民共和国刑事诉讼法中明确规定视听资料必须经过检验之后才能作为法庭证据使用<sup>[2]</sup>. 科学、量化的证实图像内容的真实性已经成为证据科学领域一个重要的研究方向.

Shihua University, Fushun 113001 5. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

复制-粘贴是目前图像伪造篡改的主要手段,根据复制源区域所在图像和粘贴目标区域所在图像之间的关系,可以分为同源复制-粘贴(Copy-move)和不同源复制-粘贴(Splicing)两大类<sup>[3-4]</sup>.针对两种不同的伪造篡改类型,检验的原理与方法也不相同.同源复制-粘贴伪造篡改图像的复制源区域和粘贴目标区域同属于一幅图像,图像中存在着至少两个高度相似的区域.从这个角度出发,同源复制-粘贴的检验方法又可以分为SIFT(Scale-invariant feature transform)<sup>[5]</sup>、SURF(Speeded-up robust features)<sup>[6]</sup>等基于特征点的方法和DCT(Discrete cosine transform)<sup>[7-8]</sup>、PCA(Principal component analysis)<sup>[9]</sup>、DWT(Discrete wavelet transform)<sup>[10]</sup>、几何不变性<sup>[11]</sup>、彩色纹理特征<sup>[12]</sup>等基于区域的方法.与同源复制-粘贴不同,不同源复制-粘贴的复制区域和粘贴目标区域来自不同的图像,也常被称之为拼接篡改.相对于同源复制-粘贴检测相似区域的思路,拼接篡改检验方法的理论基础与算法实现要更加复杂.拼接篡改伪造图像具有内容来源的多样性与篡改过程的不确定性等综合复杂特性,通常会误导人们对图像所反映的事件时间、空间、人物等重要信息的判断,对侦查与诉讼的危害程度也更高,是图像取证研究与实践中面临的主要问题.根据公安部某物证鉴定中心2012~2016年受理案件的统计数据,涉及图像取证类案例中90%以上为对单幅图像是否存在拼接篡改的检验.由于拼接篡改使用的图像形成于不同的成像过程,因此拼接篡改伪造图像中不同区域之间在光照方向<sup>[13]</sup>、光照颜色、模式噪声<sup>[14]</sup>、CFA(Color filter array)插值<sup>[15]</sup>、镜头色差<sup>[16]</sup>等光学物理特性方面存在着明显的不一致性. Farid及其团队在拼接篡改伪造图像的光学物理检验方面做出了很多探索性的工作<sup>[17]</sup>. Johnson等率先提出利用2-D、3-D光照方向估计方法进行图像的真伪性的量化检验<sup>[18]</sup>. Kee等在无限远单光源、Lambert反射以及表面法线与光照方向夹角小于90°等基本假设之后,将阴影、遮挡与光源的几何约束关系转化为矩阵求解问题,通过理论分析光照条件矩阵是否有解来判断图像中的不同物体之间是否满足无限远单光源的基本假设<sup>[19]</sup>. 牛少彰等则利用物体表面光照方向估计与投射阴影光源区域光源方向约束条件之间是否存在一致性来证明图像的真实性<sup>[20]</sup>. 陈海鹏等基于实际光照强度矩阵、Lambert简单光照模型和图像的平面法线矩阵得到光照强度矩阵后估计图像中不同区域的光源方向,然后求取不同区域光照方向估计值的差值,并与预先设定的阈值进行比较,根据比较结果检验图像中是否存在拼接篡改<sup>[21]</sup>. 上述光照方向检验方法的共同特点是基于无限远单光源、直射光、Lambert

反射等基本假设,光源方向的估计也过于依赖图像中的对象的选择,容易受到不同对象表面材质、形状与物理结构的影响导致较大的误差,且难以实现对图像拼接的自动检测与篡改区域的精确定位. 与使用光源方向作为检测依据的方法不同,文献[22]通过估计图像中不同区域的光源色温实现了拼接篡改图像的量化取证. 但该方法需要人工在图像中选择无篡改的参考区域和包含感兴趣目标的关键区域,无法实现图像伪造篡改区域的自动精确的盲定位,而且色温距离阈值的选择依赖于经验阈值,需要对同样光照条件下采集的多幅真实图像的统计分析. 文献[23]提出了一种基于人脸光源颜色分类的机器学习方法,要求预先对SVM(Support vector machine)分类器进行训练,训练过程与检验过程中同样需要人工对参与训练的图像进行人脸区域的选择和标定,而且该方法需要训练图像和待检验图像中必须包含两个或两个以上的清晰人脸,虽然取得了不错的检测效果,但假设条件过于苛刻,推广性较差.

光源的色温反映了成像光源的光谱成分,也被称为光源的颜色,是引起图像偏色的主要原因之一. 现代摄影中常采用相机的自动白平衡(Automatic white balance, AWB)来校正图像的偏色. 本文基于拼接篡改伪造图像中不同区域所反映的光源色温不同这一基本假设,利用自动白平衡理论中的色温估计方法对待检验图像中的子图像区域进行色温估计,作为区分拼接篡改区域与原始区域的基本单位特征. 相对于其他使用色温进行图像拼接篡改检测的方法<sup>[22-23]</sup>,本文方法最主要的创新之处就是检验过程中不需要再采集其他图像样本进行统计分析或训练,仅需对单幅待检验图像进行结构化的分解后,充分挖掘待检验图像子块之间的局部区域色温距离概率分布与统计信息,利用大津算法自动地选取最优分类阈值,即可实现对图像的拼接检测. 最后的仿真实验表明,由于图像色温特征的估计反映了图像中局部的光源色温现象,其估计方法基于图像像素的色彩分布统计信息,不再依赖于图像中的具体对象的选择,因此使用本文方法可以较好地实现内容无关的单幅图像拼接篡改区域的自动检测与定位.

## 1 本文方法

拼接篡改伪造图像来自于不同的成像过程,在光照方向、光照强度、光源色温等方面存在着较大的差异. 由于人类视觉系统所固有的遮蔽效应,拼接篡改伪造图像中存在的某些差异在一定程度上难以被人类视觉系统所察觉. 相对于光照方向、光照强度等大家所熟知的光源特性,光源色温的概念比较抽象,不容易被人们所理解和接受,其变化也更具

隐蔽性. 另外一方面, 由于色温变化的复杂性, 篡改者即使掌握了专业的光学物理或摄影摄像基础知识, 也无法使用专业图像处理软件精确控制拼接篡改伪造图像中不同区域之间的色温差异, 结果必然会造成拼接篡改伪造图像中拼接区域与原始区域之间色温差异的不一致性. 目前, 国内外利用色温差异的不一致性进行图像拼接篡改检测的研究成果还不多见, 且均没有实现对图像拼接篡改的自动检测与拼接篡改区域的定位, 根本原因在于图像中的原始区域和拼接篡改区域缺乏精确量化的局部分类特征, 现有特征表示方法大多依赖图像中的内容或目标, 不适用于解决案件中常见的单幅图像检验问题.

综上所述, 如果将单幅图像拼接篡改检测与定位看作一个待检验图像的像素集合  $I$  的二类分类问题, 拼接区域像素集合  $S$  与原始区域像素集合  $O$  表示分类类别, 则如下条件成立:

$$\forall I = S \cup O, \exists S \cap O = \phi$$

理论上的分类依据和结果也可以简单描述为:  $S \neq \phi \Rightarrow$  图像存在拼接篡改;  $S = \phi \Rightarrow$  图像不存在拼接篡改. 因此, 有效利用已知的成像过程光学物理规律和单幅图像中像素的统计分布规律, 提高图像局部区域特征的分类描述能力和自动化提取程度, 才能更好地实现图像拼接篡改的自动检测与精确定位.

### 1.1 方法流程

如图 1 所示为本文提出的基于自动色温距离阈值的图像拼接篡改检测方法的流程图, 流程图出现的变量及其描述参见表 1. 首先, 对待检验图像  $f(x, y)_{\text{RGB}}$  进行预处理, 得到  $f(x, y)_{\text{YCbCr}}$  和分块后的子图像块  $\text{Block}_{ij}(x, y)$ ; 然后, 对每一个  $\text{Block}_{ij}(x, y)$  进行色温估计得到  $C_{ij}$ , 计算嫌疑区域和参考区域之间的色温距离  $D_{ij}$ ; 最后, 通过对嫌疑区域子图像块的色温距离与自动色温距离阈值  $T$  进

行比对后完成拼接篡改区域的自动检测与定位, 得到自动标注后的篡改区域  $R_{\text{MAP}}$ .

表 1 方法流程图中出现的变量及其描述  
Table 1 Description of variables in framework

变量名	含义描述
$f(x, y)_{\text{RGB}}$	RGB 色彩空间的待检验图像
$f(x, y)_{\text{YCbCr}}$	YCbCr 色彩空间的待检验图像
$\text{Block}_{ij}(x, y)$	YCbCr 色彩空间的子图像块
$C_{ij}$	每一个子图像块所对应的色温估计值
$\text{Area}_R$	参考区域, 由子图像块构成的假设无篡改区域
$\text{Area}_S$	嫌疑区域, 可能包含篡改区域的子图像块集合
$D_{ij}$	嫌疑区域与参考区域之间的色温距离
$T$	自动估计的色温距离阈值
$R_{\text{MAP}}$	比较色温距离与色温距离阈值后确定的篡改区域

### 1.2 图像预处理

不同的色彩空间分别从不同的空间维度对图像的色彩特征进行描述, 从而满足不同的应用需求. RGB 色彩空间与人类视觉系统中锥状细胞的感色波长范围相对应, 更符合人类视觉系统对色彩的感受习惯. 目前, 图像的获取与显示多使用 RGB 色彩空间, 绝大多数的照相机、手机等成像设备都是采用 RGB 色彩空间记录获得的图像数据. 同样, Photoshop 等图像篡改常用软件的大部分编辑处理功能也是针对 RGB 色彩空间的特点进行设计开发. 篡改者为了使拼接篡改后的伪造图像能够被人类视觉系统所接受, 达到视觉上以假乱真的效果, 通常会选择在 RGB 色彩空间图像内容进行拼接篡改操作. 相对于 RGB 色彩空间, YCbCr 色彩空间是一类特殊的色彩空间, 它更便于发现并计算图像的平均色差, 常出现在自动白平衡 (AWB) 算法中用于对光源色温的估计. 通过将待检验图像从 RGB 空间变换至 YCbCr 色彩空间, 可以更容易地发现并量化描述拼接篡改

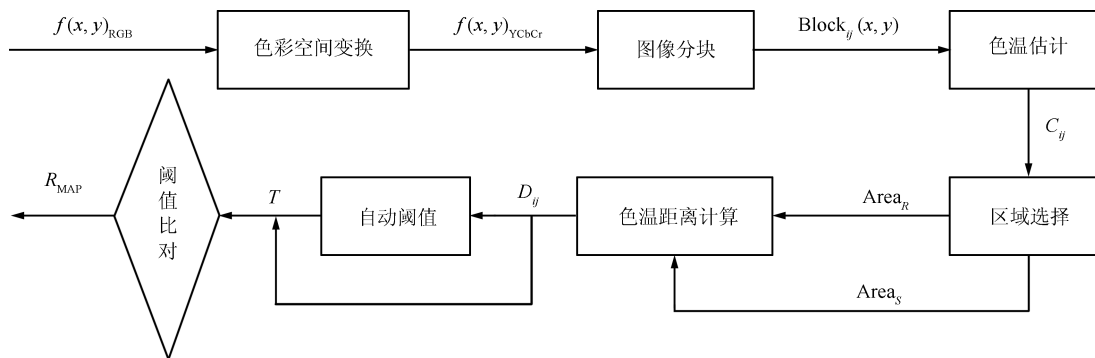


图 1 方法流程图

Fig. 1 Framework of method

区域与原始区域在色温方面的特征差别. 因此, 为了同时实现对拼接篡改区域的自动检测与定位, 需要对图像进行预处理, 具体包括图像  $RGB \rightarrow YCbCr$  色彩空间变换和图像分块两个部分. 首先, 根据 ITU.BT-601 的标准对  $RGB$  色彩空间内的待检验图像  $f(x, y)_{RGB}$  ( $x = 1, 2, \dots, M, y = 1, 2, \dots, N$ ) 进行色彩空间转换, 得到  $YCbCr$  色彩空间内的待检验图像  $f(x, y)_{YCbCr}$  ( $x = 1, 2, \dots, M, y = 1, 2, \dots, N$ ).

由于图像拼接篡改的复杂性与不确定性, 无法预知图像是否发生拼接篡改或拼接篡改区域在图像中的位置. 为了方便对图像中的拼接篡改区域进行自动的检测与定位, 还需要对  $f(x, y)_{YCbCr}$  进行结构化分解. 结构化分解的目的是建立图像拼接篡改检测的最基本的结构单元, 这样既可以利用色温特征量化描述子图像块之间的差异, 又可以通过子图像块组合的方式发现图像中不同区域的色温一致性特征, 并进行疑似篡改区域的标注. 相对于 Segmentation-based、Keypoint-based 等分块方法, Grid-based 是一种简单的图像结构化分解方式<sup>[24]</sup>, 即将图像等分为  $n \times n$  像素大小的不重叠子图像块  $Block_{ij}(x, y)$  ( $i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, L$ ) 的组合, 其中,  $K = \text{floor}(M/n)$ ,  $L = \text{floor}(N/n)$ , 取整运算后图像边缘处的少量像素将被舍弃. Grid-based 方法的优点在于子图像中包含有更多的色彩变化信息, 更符合颜色的统计分布规律, 而 Segmentation-based、Keypoint-based 的方式则导致分块后的子图像中包含了大块的单一色彩、单一边缘等特征, 对后面色温估计的准确性造成影响.

### 1.3 色温估计算法

相机自动白平衡的色温估计算法是一种基于图像全局像素的迭代估计方法, 主要的目的是根据环境色温变化情况寻找图像中的白色区域, 通过白色区域所反映的光源色温特征自适应地对图像中存在的偏色进行校正<sup>[25-26]</sup>. 在实际的计算中, 为了减少计算量, 提高色温估计的效率与自动白平衡的实时性, 通常会选取图像中某个特定区域中的像素作为有效像素, 来计算平均色差作为色温的估计值. 文献<sup>[27]</sup>提出了如式 (1) 所示的约束条件:

$$Y - |Cb| - |Cr| > \varphi \quad (1)$$

其中,  $\varphi$  为约束因子. 在约束条件 (1) 所描述的控制区域当中, 当  $Y$  较小时,  $Cb$  和  $Cr$  范围控制的很紧, 只有少量像素可以参与色差计算, 保证运算的实时性; 而当  $Y$  增大时,  $Cb$  和  $Cr$  的范围相应放大, 使更多的像素可以参与平均色差计算, 从而提高色温估计的精度. 对于某一大小为

$n \times n$  的子图像块  $Block(x, y)_{YCbCr}$ , 其中,  $x, y = (1, 2, \dots, n-1, n)$ ,  $Block(x, y)_Y$ ,  $Block(x, y)_{Cb}$  和  $Block(x, y)_{Cr}$  分别表示像素  $(x, y)$  在  $YCbCr$  空间的值. 遍历  $Block(x, y)_{YCbCr}$  中符合约束条件 (1) 的像素, 按照式 (2) 估计该子图像块的色温:

$$Y_{ij}^C = \frac{\sum_{m=1}^N Y_m}{N}, Cb_{ij}^C = \frac{\sum_{m=1}^N Cb_m}{N}, Cr_{ij}^C = \frac{\sum_{m=1}^N Cr_m}{N} \quad (2)$$

式中,  $N$  表示符合约束条件 (1) 的像素数量. 为了实现图像拼接篡改的自动检测与定位, 对每一个子图像块  $Block_{ij}$  进行色温估计, 对应的色温估计集合  $C_T = \{C_{ij} | (i = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, L)\}$ , 其中  $C_{ij} = (Y_{ij}^C, Cb_{ij}^C, Cr_{ij}^C)$ .

### 1.4 参考区域的选取

参考区域的选取对于实现单幅图像拼接篡改的自动检测与篡改区域的定位非常重要, 直接关系图像拼接篡改区域检测和拼接篡改区域定位的准确性. 本文仅考虑图像中包含有一个拼接区域的情况, 令  $Area_R$  表示图像中的参考区域,  $Area_O$  表示图像中没有发生拼接篡改的原始区域,  $Area_P$  表示图像中的拼接区域, 上述区域应当满足如下的关系:

$$\begin{aligned} Area_P < Area_O; Area_R \in Area_O; \\ Area_R \cap Area_P = \phi \end{aligned} \quad (3)$$

图像拼接篡改检测与定位中参考区域的选择非常重要, 决定了拼接篡改自动检测与定位的准确性. 根据对大量篡改实验图像的统计可知, 绝大部分的拼接篡改区域位于待检验图像的中心区域. 这是因为篡改者对一幅图像进行拼接篡改伪造的出发点是改变该图像内容所反映的案件语义信息, 从而误导人们对图像所反映的案事件事实的判断. 对于人类视觉系统, 图像边缘图像子块所包含像素基本不具备完整的语义表达能力或较弱的语义表达能力. 简单来说, 单纯地针对边缘区域内容进行刻意的伪造篡改无法满足篡改者试图引导人们产生错误的图像语义理解的目的. 另外一种情况, 即使篡改区域中包含少部分图像边缘区域 (主要位于图像的下部边缘、左右边缘其次、上边缘再次), 这些包含了篡改区域的子块数量在参考区域中所占比例也比较低, 通常不会对参考色温的估计产生较大的影响. 极端情况下, 如果作为参考区域选取的图像边缘中大部分图像子块位于拼接篡改区域, 那么文中对参考区域与嫌疑区域的假设出现角色互换, 假设的参考区域变为实际的篡改区域. 由于本文提出的拼接篡改检测与定位方法本质上是根据色温估计的差异程度对子

图像块进行分类, 参考区域与嫌疑区域的假设出现角色互换后不会影响色温距离的估计, 不会影响最终检测与定位的结果.

根据上面的分析可知, 如果令  $P_{ij}$  表示子图像块  $\text{Block}_{ij}$  为拼接篡改区域的概率, 则待检验图像的不同子图像块之间存在如下的关系:

$$\begin{aligned} P_{Kj} &\leq P_{(K-1)j} \leq \cdots \leq P_{(K-b)j} \\ P_{iL} &\leq P_{i(L-1)} \leq \cdots \leq P_{i(L-d)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $P_{(K-b)j}$  和  $P_{i(L-d)}$  表示图像中位于中心区域的某两个子图像块,  $\text{Block}_{(K-b)j}$  和  $\text{Block}_{i(L-d)}$  落入拼接篡改区域的概率.

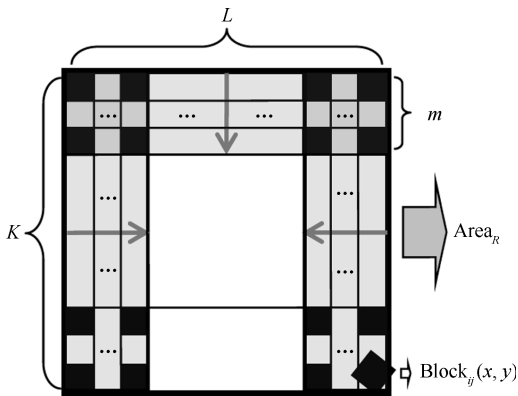


图2 参考区域选择策略  
Fig.2 Strategy of reference area selection

综上所述, 如图2所示, 令  $m$  为径向因子, 由其确定的径向因子约束条件可以简单描述为:  $\forall i_a \in E_v, i_b \in I, \exists |i_a - i_b| \leq m$ , 同理  $\forall j_a \in E_h, j_b \in J, \exists |j_a - j_b| \leq m$ , 其中  $E_v = \{1, K\}$ ,  $E_h = \{1, L\}$ ,  $I = \{i | i \leq K, i \in N+\}$ ,  $J = \{j | j \leq L, j \in N+\}$ . 从待检验图像的上、左、右边缘子图像块开始, 沿着指向待检验图像中心的水平和垂直方向, 逐行或逐列地选择所有符合径向因子约束条件的边缘子图像块组成参考区域  $\text{Area}_R = \{\text{Block}_{ij}(x, y) | [i = (1, 2, \dots, K), j = (1, 2, \dots, m, L - m + 1, \dots, L)] \cup [i = (1, 2, \dots, m), j = (m + 1, \dots, L - m)]\}$ . 确定了待检验图像的参考区域之后, 利用之前介绍的色温估计算法估计参考区域中每一个子图像块的色温, 并按照如下的公式计算参考区域的平均色温:

$$\begin{aligned} \overline{C}_R &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L (w_{ij} \times C_{ij}) + \frac{1}{m \times L + 2m(K - m)} \times \\ &\quad \left[ \sum_{i=m+1}^K \left[ \sum_{j=1}^m (w_{ij} \times C_{ij}) + \sum_{j=L-m+1}^L (w_{ij} \times C_{ij}) \right] \right] \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $w_{ij}$  表示构成参考区域的每一个子图像块的权值, 取值范围  $0 < w_{ij} < 1$ . 根据式(5),  $w_{ij}$  与子图像块落入拼接篡改区域的概率成反比, 即子图像块落入拼接篡改区域的概率越大, 则权值  $w_{ij}$  越大, 反之亦然.

### 1.5 色温距离的计算

为了量化地评价不同子图像块之间色温的差异程度, 采用欧氏距离计算子图像块与参考区域之间的色温距离. 令  $C_{ij} = (Y_{ij}, Cb_{ij}, Cr_{ij})$  表示嫌疑区域  $\text{Area}_S$  中每一个子图像块的色温估计值,  $\overline{C}_R = (\overline{Y}_R, \overline{Cb}_R, \overline{Cr}_R)$  表示参考色温, 那么可以用式(6)所示的欧氏距离来计算嫌疑区域  $\text{Area}_S$  的每一个子块  $\text{Block}_{ij}(x, y)$  与参考区域  $\text{Area}_R$  之间的色温距离:

$$D_{ij} = \sqrt{(C_{ij} - \overline{C}_R)^2} \quad (6)$$

展开后得到:

$$D_{ij} = \sqrt{(Y_{ij} - \overline{Y}_R)^2 + (Cb_{ij} - \overline{Cb}_R)^2 + (Cr_{ij} - \overline{Cr}_R)^2} \quad (7)$$

最终得到每一个子图像块与参考区域之间的色温距离序列  $D_{ij}$ . 色温距离可以量化地评价待检验图像中不同子图像块之间的色温特征差异程度. 在真实图像中, 不同子图像块所反映的光源色温具有一致性, 差异程度应当在一定的范围内, 如果一幅待检验图像中不同子图像块之间的色温差异程度过大则说明该图像存在拼接篡改的可能性较大.

### 1.6 自动定位拼接区域

当图像中存在拼接篡改区域时, 位于拼接篡改区域的子图像块与原始的未经过拼接篡改的子图像块之间的色温距离相对于其他子图像块之间的色温距离就会表现出非常明显的差异. 理论上拼接篡改图像中一定会存在一个色温距离的阈值  $Th$ , 可以近似地根据色温距离序列  $D_{ij}$  与  $Th$  的比较关系, 将其分为原始区域像素集合  $O$  和拼接篡改区域像素集合  $S$  两个部分:

$$\text{Block}_{ij}(x, y) \in \begin{cases} O, & D_{ij} \leq Th \\ S, & D_{ij} > Th \end{cases} \quad (8)$$

根据上面的公式, 可以确定每一个子图像块  $\text{Block}_{ij}(x, y)$  是否属于拼接篡改区域.

如何自适应地确定一个用于分类的色温距离阈值对于实现单幅图像拼接篡改区域的自动检测与定位非常重要. 为了实现拼接篡改区域的自动检测与定位, 本文利用最大类间距离算法<sup>[25]</sup>自适应地确定色温距离的阈值. 使用该算法确定的最佳阈

值进行分类, 可以实现分类后的子图像块类内色温距离最小, 类间色温距离最大. 假设色温距离序列  $D_{ij}$  中某一距离值  $l \in [d_{\min}, d_{\max}]$  的个数为  $n_l$  其中  $d_{\min}$  表示色温距离序列  $D_{ij}$  中的距离值下限,  $d_{\max}$  表示色温距离序列  $D_{ij}$  中的距离值上限. 假设存在一个阈值  $T$  将色温距离序列  $D_{ij}$  分为两组集合: 原始区域  $C_1 = \{d_{\min}, \dots, T\}$  和拼接篡改区域  $C_2 = \{T^+, \dots, d_{\max}\}$ ,  $T^+$  表示  $C_2$  中大于  $T$  的距离最小值. 可以根据文献 [25] 的大津算法估计各色温距离值的分布概率  $p_l$ 、集合  $C_1$  和  $C_2$  的分布概率、统计均值等, 遍历  $T \in [d_{\min}, d_{\max}]$ , 计算集合  $C_1$  和  $C_2$  的类间方差  $\sigma^2(T)$ , 其中, 迭代运算后满足  $\sigma^2(T)$  最大时的  $T$  即为最终确定的最优色温距离分类阈值  $Th$ .

### 1.7 篡改定位结果的量化评价算法

为了更科学客观地评价本文提出的拼接篡改检测方法的效果, 采用基于像素的检测评价标准<sup>[28]</sup> 对拼接篡改检测结果进行量化评价. 令  $T_p$  表示检测出的属于拼接区域的正确的像素数量,  $F_p$  表示被错误地识别为拼接区域的像素数量,  $F_N$  表示没有检测出来的属于拼接区域的像素数量, 可以定义如下的识别准确率  $P$  和召回率  $R$ :

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (9)$$

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N} \quad (10)$$

同时, 为了更好地综合评判识别准确率  $P$  和召回率  $R$ , 又引入一个评测因子  $F_1$ :

$$F_1 = 2 \times \frac{P \times R}{P + R} \quad (11)$$

基于上述评测标准就可以针对不同的检验要求, 对不同类型的拼接篡改伪造图像的检测结果进行量化的评价. 如果检测要求倾向于发现所有可能的拼接篡改区域, 则检测结果应当对应一个比较大的召回率  $R$ ; 如果检测要求倾向于较小的检测误差, 则检测结果应当对应一个比较大的识别准确率  $P$ ; 如果没有明确的检测要求时, 通常可以简单地认为当  $F_1$  越大, 检测结果越好, 此时召回率  $R$  和识别准确率  $P$  之间处于一种相对平衡的状态. 在实验中发现, 选择不同的约束因子  $\varphi$ , 色温估计和色温距离的值会发生较明显的变化, 最终则会影响到自动色温聚类阈值  $T$  的计算和拼接篡改检测的结果.

同样, 为了更好地综合评价本文方法对拼接篡改伪造图像的检测效果, 令  $t_p$  表示检测出的属于拼接篡改的正确的图像数量,  $f_p$  表示被错误地识别为拼接篡改的原始图像的数量,  $f_N$  表示没有检测出来

的属于拼接图像的图像数量, 可以定义如下的基于图像的识别准确率  $p$  和召回率  $r$ :

$$p = \frac{t_p}{t_p + f_p} \quad (12)$$

$$r = \frac{t_p}{t_p + f_N} \quad (13)$$

在后面的实验中, 通过对真实图像和拼接篡改伪造图像的识别结果进行分析计算图像的识别准确率和召回率. 对于真实图像, 令  $\hat{F}$  表示被错误地识别为拼接区域的像素数量阈值,  $\hat{L}$  表示连通区域面积的阈值 (实际实验中使用图像宽度  $\times$  高度  $\times$  百分比的形式确定  $\hat{F}$  和  $\hat{L}$ ), 使用被错误地识别为拼接区域的像素数量  $F_p$  和其所构成的连通区域面积  $LINK(F_p)$  计算  $f_p$ , 具体算法如算法 1 所示:

#### 算法 1.

```

if  $\{(F_p \geq \hat{F}) \text{ and } [LINK(F_p) \geq \hat{L}]\}$ 
 $f_p + 1$  %将真实图像识别为拼接篡改伪造图像
end if
next loop

```

对于拼接篡改伪造图像而言, 使用评测因子  $F_1$  计算  $t_p$  和  $f_N$ , 具体如算法 2 所示:

#### 算法 2.

```

if  $(F_1 \geq F_T)$ 
 $t_p + 1$  %正确识别拼接篡改伪造图像
else
 $f_N + 1$  %无法正确识别拼接篡改伪造图像
end if
next loop

```

## 2 实验与分析

### 2.1 数据准备

为了验证本文方法的有效性, 使用哥伦比亚大学彩色拼接图像库 DVMM<sup>[29]</sup> 和自建数据库进行测试实验. DVMM 包含 183 幅真实图像和 180 幅拼接图像, 其中真实图像来自于 4 种不同的相机: Canon G3, Nikon D70, Canon 350D Rebel XT, Kodak DCS 330, 经过了不同程度的裁剪后存储为无压缩的 TIFF 格式, 图像像素大小在  $757 \times 568$  到  $1152 \times 768$  的范围之间. 图像内容涵盖了室内物品、走廊以及室外建筑, 成像光照条件包括室内光源、室外阳光、阴天、阴影等. 数据库中的拼接篡改伪造图像是使用 Photoshop 软件随机地对两幅不同的真实图像进行剪切、复制与拼接后得到.

目前, 基于光源特征不一致的拼接篡改检验方法<sup>[13-23]</sup> 都是利用了拼接篡改伪造图像中可能存在

的某一光学物理特征差异展开检验研究, 而已知的国际标准数据库中图像样本的光源特征分布极不均匀, 很多情况下难以全面客观地评价不同拼接篡改检测方法的检验效果. 为了系统科学地验证方法的有效性, 文献 [14–23] 等分别采集了不同光照条件、设备条件的图像数据, 各自构建了能够验证不同类别算法的测试数据库. 本文分别构建了三个数据库 D1、D2 和 D3. 在晴天室外日光条件下使用 6 种白平衡模式 (自动、日光、阴影、阴天、钨丝灯、白色日光灯) 来模拟不同光源色温条件, 各拍摄 10 幅简单背景单一人物的图像素材 (图像像素大小为  $3072 \times 2048$ 、 $4912 \times 2760$ ), 共计 60 幅图像组成原始图像数据库 D1. 采集图像时使用的相机型号: PENTAX K-r 单反照相机; 镜头型号: DAL 18-55 mm. 从 D1 数据库中选取不同白平衡设置条件下获取的原始图像素材各 5 张, 使用 Photoshop 软件制作 60 幅拼接篡改伪造图像, 构成拼接篡改伪造图像数据库 D2, 每幅图像仅包含一次拼接篡改. 原始图像数据库 D1 和拼接篡改伪造数据库 D2 共同构成了综合评价的测试数据库 D3. 每一类伪造图像都是以自动白平衡下获取的图像为粘贴目标图像, 将其他白平衡设置下获取的图像作为拼接篡改伪造的源图像, 选择其中的人物复制后粘贴在目标图像中得到拼接篡改伪造图像. 本文选择该类素材图像作为实验样本的原因有三个: 1) 简单背景单一人物素材图像由于缺少明显参照物, 文献 [14–23] 或是无法检测或是难以准确检测, 是目前公认的图像拼接篡改的难题之一; 2) 简单背景单一人物素材图像在实际的图像拼接篡改检测中非常常见, 常作为某些案件中犯罪嫌疑人不在现场的证据使用, 具有明确的应用价值; 3) 人体的非刚性、姿态、表情等不规则形态、皮肤反射率的差异以及脸部凸面、凹面和类平面的多地形结构特点导致图像中人物的遮挡、阴影、光线漫反射、镜面反射现象的同时存在, 使得涉及人

物拼接篡改的图像检测研究极具挑战性, 具有较大的科学研究价值.

## 2.2 拼接篡改检测

### 1) 检测结果的主观视觉评价

首先, 使用哥伦比亚数据库中的拼接篡改伪造图像对本文方法进行测试. 部分检测结果如图 3 所示, 其中, (a-1)~(a-8) 表示哥伦比亚数据库中的拼接篡改伪造图像, (b-1)~(b-8) 表示对应的图像中拼接篡改区域的检测结果, 其中标注区域表示检测出的疑似拼接篡改区域. 如图 3 所示, 本文方法可以较好地实现对哥伦比亚数据库中拼接篡改伪造图像的自动检测与拼接篡改区域的定位.

图 4 为使用本文方法对 D2 数据库进行拼接篡改伪造图像检测的部分结果, 实验开始前只需根据样本统计或经验, 人工选取设置参考区域的径向因子  $m$  和参考区域平均色温估计的权值  $w_{ij}$ , 设计开发的拼接篡改检测仿真系统即可自动地对图像进行拼接篡改区域的检测与定位. 实验中的参数设置如表 2 所示, 为归一化后的最优阈值:

表 2 实验参数设置

Table 2 Configuration of experiments

	$m$	$w_{ij}$	$\varphi$	$Th$
(a-1)	5	0.4, 0.3, 0.2, 0.15, 0.05	43	0.34118
(b-1)			58	0.35686
(c-1)			44	0.32157
(d-1)			81	0.21569
(e-1)			54	0.23725

同样令图像中标注区域表示检测出的疑似拼接篡改区域. (a-1)~(e-1) 分别对应 (自动 + 日光)、(自动 + 阴天)、(自动 + 阴影)、(自动 + 荧光灯)、(自动 + 钨丝灯) 等 5 类

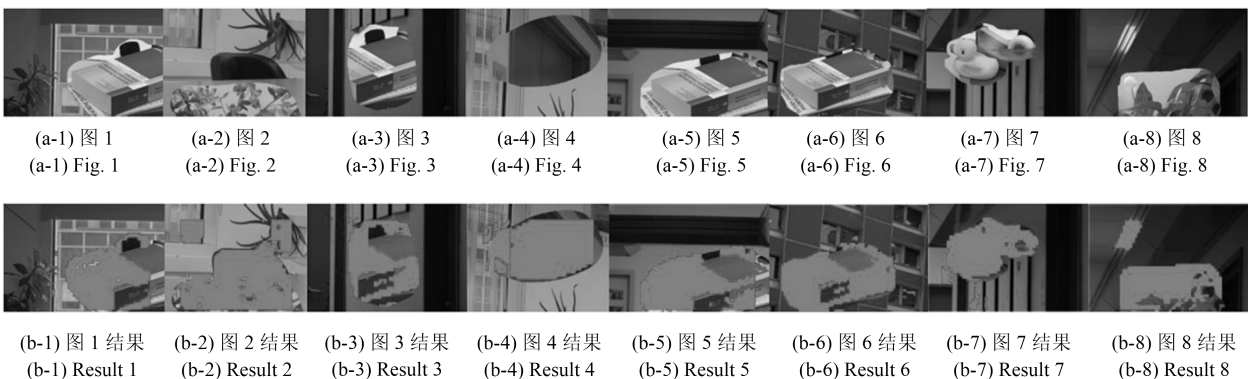


图 3 哥伦比亚数据库的检测效果 (a-1)~(a-8) 为哥伦比亚数据库中的拼接篡改图像; (b-1)~(b-8) 为本文方法的检测结果  
Fig. 3 Detection on DVMM (a-1)~(a-8) Splicing images in experiments; (b-1)~(b-8) Detection results

with proposed method





图 4 拼接篡改伪造图像检测的主观视觉评价 ((a-2)~(e-2) 本文方法检测结果; (a-3)~(e-3) 拼接篡改图像 MASK; (a-4)~(e-4) 文献 [18] 方法的检测结果; (a-5)~(e-5) 文献 [18] 光照方向检测 2-D 模型)

Fig. 4 Visual evaluation of detection on splicing images ((a-2)~(e-2) Detection results with proposed method; (a-3)~(e-3) MASK of splicing images; (a-4)~(e-4) Detection results with [18]; (a-5)~(e-5) 2-D model of illumination direction in [18])

典型的具有色温差异的拼接篡改伪造图像. 相对于哥伦比亚数据库, D2 数据库中的单一人物拼接篡改伪造图像的真实感更强. 从 (a-2)~(e-2) 所示的实验结果来看, 本文方法同样可以实现对 D2 数据库中拼接篡改伪造图像的自动检测与拼接篡改区域的定位. 其中 (自动 + 荧光灯)、(自动 + 钨丝灯)

两类拼接篡改的检测效果最好, 在检测出绝大部分拼接篡改区域的同时, 误检区域较少; 而对 (自动 + 日光)、(自动 + 阴天)、(自动 + 阴影) 三类拼接篡改, 一方面基本检测出所有的拼接篡改区域, 但误检区域却相对较多, 包括了绝大部分与人物皮肤、衣着色彩相近的地面、石凳等. 为了更好地说明色温分



类方法的有效性, 采用文献 [18] 对同样的图像数据进行拼接篡改检测的对比实验. (a-4)~(e-4) 为文献 [18] 的检测结果, 其中曲线为人工添加的物体边缘, 箭头表示估计的光照方向, (a-5)~(e-5) 为文献 [18] 方法中使用的光照方向估计模型, 通过 2-D 球体的明暗分布可以判断光源的方向. 从实验结果中可以观察到, 文献 [18] 的光照方向估计方法同样存在着较大的误差. 相对于文献 [18] 的光照方向估计方法, 色温分类方法不需要人工标注图像中的嫌疑目标边缘, 能够自动地完成检测过程, 同时更直观地定位图像中的拼接篡改区域.

## 2) D2 数据库检测结果的量化评价

为了更好地了解  $\varphi$  值选取对检测结果的影响, 以步长“1”改变  $\varphi$  值, 在 D2 数据库进行拼接篡改检测实验, 并采用基于像素的量化评价方法评价检

测的结果. 得到如图 5 所示的  $T, R, P, F_1$  随  $\varphi$  值变化的曲线图.

实验中 Grid-based 分块方法  $n = 16$ , 自动色温距离阈值经过了归一化处理, 约束因子  $\varphi$  选取范围  $[0 \rightarrow 120]$ , 变化步长为“1”, 根据之前对拼接篡改检测量化评价指标的定义, 可以认为评测因子  $F_1$  取最大值时, 对应着最佳的拼接篡改检测效果, 拼接篡改检测结果为图 4(a-2)~(e-2), 对应的最佳约束因子  $\varphi_{best}$ , 识别准确率  $P$  和召回率  $R$  如表 3 所示.

## 3) D3 数据库检测结果的量化评价

在综合测试数据库 D3 上进行基于图像的综合评测, 实验中的参数设置为  $\hat{F} = M \times N \times 3\%$ ;  $\hat{L} = M \times N \times 2\%$ ;  $F_T = 0.45$ . 与文献 [18, 22-23] 的定性、定量评价结果如表 4 所示, 其中文献 [23] 的方法使用前需要预先训练分类器, 不能对常见的

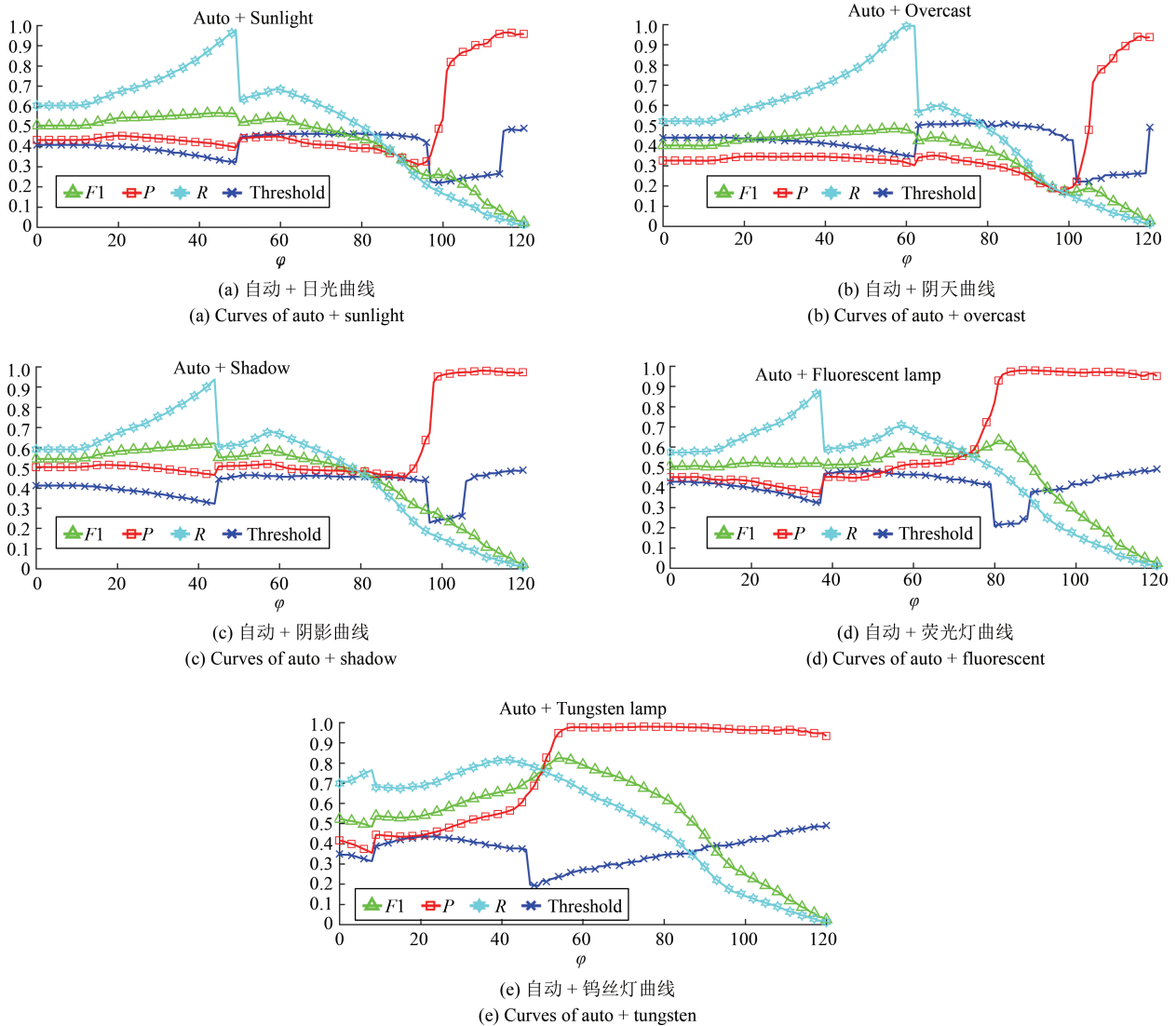


图 5 不同类型拼接篡改伪造图像的识别准确率、召回率与综合评测因子随  $\varphi$  值的变化曲线

Fig. 5 Curves of  $R, P$  and  $F_1$  on different splicing images with variation of  $\varphi$

表 3  $\varphi$  遍历寻优后的量化实验结果Table 3 Detection results with ergodic optimization of  $\varphi$ 

参数	自动 +				
	日光	阴天	阴影	荧光灯	钨丝灯
$F_1$	0.566 6	0.484 4	0.620 5	0.631 9	0.823 7
$R$	0.886 5	0.967 0	0.937 7	0.478 8	0.728 0
$P$	0.416 4	0.323 2	0.463 7	0.929 2	0.948 4
$\varphi_{\text{best}}$	43	58	44	81	54

单幅图像内容的真伪性进行检验, 使用过程中还需要手动选择人脸区域. 受到训练集制作、训练参数选择、图像中人脸区域数量等因素的影响, 方法无法确定平均执行时间. 而且, 由于该方法仅适用于图像中包含两个或两个以上的人脸区域的情况, 因此不能对 D3 数据库 (仅包含一个人脸区域) 中的拼接篡改伪造图像进行检测.

### 3 讨论

同源复制-粘贴方法绝大多数围绕相似块对特征比对的思路展开研究, 经过多年的研究已经形成了标准测试数据库和量化对比的实验条件<sup>[6-12]</sup>. 然而, 由于图像成像过程中复杂多变的光照条件、不可预知的拼接篡改操作等因素的存在, 导致图像的拼接篡改过程具有较强的模糊性与不确定性, 基于光学物理的拼接篡改检测方法还没有完备的测试数据库和成熟的量化比对标准, 彼此之间难以进行科学量化的比较<sup>[14-23]</sup>. 但是与文献 [14-23] 的方法相比较, 本文方法还是表现出如下的一些优点: 1) 量化检测程度高. 可以实现单幅图像拼接篡改检测的量化评价并精确定位拼接篡改区域, 同时由于使用不依赖于图像语义内容的色温估计代替光照方向估计作为检测的物理依据, 避免了非直射光、语义内容依赖、设备依赖等因素对检测结果的影响. 能够得出量化的检测结果, 且更具鲁棒性与全局性. 2)

自动化检测程度高. 既不需要严格的光照条件假设、图像内容假设, 也不需要手动的在图像中选择物体边缘或人脸区域等, 可以最大程度地避免人工干预引入的误差和检测结果的不确定性, 通过分块特征估计、距离计算与分类, 实现了拼接篡改区域检测与定位的自动化. 3) 实时检测效果好. 量化评价与自动定位操作简便, 实时性强. 在处理器: Intel Corel(TM) i56300HQ CPU @ 2.30 GHz; 仿真实验环境: Matlab2012a 条件下, 本文方法的平均检测时间在 4~6s 之间. 其他方法在检测过程中都需要在图像中人工标注物体边缘或人脸区域等, 根据熟练程度的不同, 平均检测时间在 20~100s 之间, 其中文献 [19, 23] 的操作复杂度较高, 受到对象数量、遮挡和阴影复杂程度不同的影响, 时间难以估计.

### 4 结论

本文提出了一种基于自动色温距离阈值的图像拼接篡改检验方法, 利用色温估计、色温距离计算和自动色温距离阈值分类发现拼接篡改伪造图像中不同区域之间的色温不一致现象, 从而实现图像拼接篡改区域的自动检测与定位, 满足对拼接篡改图像量化取证的需要. 实验结果表明, 本文方法能够较好地自动检测拼接篡改并定位拼接篡改区域, 为图像拼接篡改检测提供了一类科学量化的检验依据. 未来的研究工作将致力于从三个方面改进方法: 1) 研究如何将色温特征与成像过程中的其他光学物理特征相结合, 增强算法的鲁棒性; 2) 研究如何利用背景建模或显著性检测更准确地定义与选择图像中的参考区域, 降低背景颜色噪声对篡改区域定位的影响; 3) 引入动态多阈值分类, 研究图像中存在多于两处拼接篡改的检验. 对方法进行改进的最终目的是进一步提高图像拼接篡改区域自动检测与定位的准确性和鲁棒性, 满足实际的图像内容真实性检验的需要.

表 4 在 D3 上的综合评价测试结果 (%)

Table 4 Image level measurement on D3 (%)

	执行方式	检验单幅图像?	量化定位篡改区域?	识别参数	自动 +				
					日光	阴天	阴影	荧光灯	钨丝灯
本文方法	Auto	能	能	$r$	100	100	100	100	100
				$p$	76	69	69	85	92
文献 [18]	Semi-auto	能	不能	$r$			72		
				$p$			68		
文献 [23]	Semi-auto	不能	不能	$r$			#		
				$p$			#		
文献 [22]	Semi-auto	能	不能	$r$			92		
				$p$			73		

## References

- 1 Farid H. Creating and Detecting Doctored and Virtual Images: Implications to the Child Pornography Prevention Act. Technical Report TR2004-518, Department of Computer Science, Dartmouth College, USA, 2004.
- 2 Huang Tai-Yun. Interpretation of the amendment of the Criminal Procedure Law. *People's Procuratorial Semimonthly*, 2012, (8): 10–73  
(黄太云. 刑事诉讼法修改释义. 人民检察, 2012, (8): 10–73)
- 3 Al-Qershi O M, Khoo B E. Passive detection of copy-move forgery in digital images: state-of-the-art. *Forensic Science International*, 2013, **231**(1–3): 284–295
- 4 Cao Y J, Gao T G, Fan L, Yang Q T. A robust detection algorithm for copy-move forgery in digital images. *Forensic Science International*, 2012, **214**(1–3): 33–43
- 5 Amerini I, Ballan L, Caldelli R, Del Bimbo A, Serra G. A SIFT-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011, **6**(3): 1099–1110
- 6 Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van Gool L. Speeded-up robust features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, **110**(3): 346–359
- 7 Fridrich J, Soukal D, Lukáš J. Detection of copy-move forgery in digital images. *International Journal*, 2003, **3**(2): 652–663
- 8 Wang W, Dong J, Tan T N. Exploring DCT coefficient quantization effects for local tampering detection. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2014, **9**(10): 1653–1666
- 9 Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions. Technical Report TR2004-515, Dartmouth College, USA, 2004
- 10 Khan S, Kulkarni A. An efficient method for detection of copy-move forgery using discrete wavelet transform. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2010, **2**(5): 1801–1806
- 11 Lv Ying-Da, Shen Xuan-Jing, Chen Hai-Peng. Blind forensic for image copy-paste tampering with geometric invariance. *Acta Electronica Sinica*, 2016, **44**(11): 2592–2599  
(吕颖达, 申铎京, 陈海鹏. 具有几何不变性的图像复制-粘贴盲鉴别算法. 电子学报, 2016, **44**(11): 2592–2599)
- 12 Zhu Ye, Shen Xuan-Jing, Chen Hai-Peng. Covert copy-move forgery detection based on color LBP. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(3): 390–397  
(朱叶, 申铎京, 陈海鹏. 基于彩色 LBP 的隐蔽性复制-粘贴篡改盲鉴别算法. 自动化学报, 2017, **43**(3): 390–397)
- 13 Johnson M K, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting. In: Proceedings of the 7th Workshop on Multimedia and Security, MM&Sec 2005. New York, NY, USA: ACM Press, 2005. 1–10
- 14 Chen M, Fridrich J, Goljan M, Lukas J. Determining image origin and integrity using sensor noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, **3**(1): 74–90
- 15 Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, **53**(10): 3948–3959
- 16 Johnson M K, Farid H. Exposing digital forgeries through chromatic aberration. In: Proceedings of the 8th Workshop on Multimedia and Security, Mm&Sec 2006. Geneva, Switzerland: ACM Press, 2006. 48–55
- 17 Farid H. Image forgery detection. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, **26**(2): 16–25
- 18 Johnson M K, Farid H. Exposing digital forgeries in complex lighting environments. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2007, **2**(3): 450–461
- 19 Kee E, O'Brien J F, Farid H. Exposing photo manipulation from shading and shadows. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, **33**(5): Article No. 165
- 20 Niu Shao-Zhang, Huang Yan-Li, Sun Xiao-Ting. Image tampering detection by consistency of projection and lighting direction. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2014, **37**(5): 61–65  
(牛少彰, 黄艳丽, 孙晓婷. 投影与光照方向一致性的图像篡改检测. 北京邮电大学学报, 2014, **37**(5): 61–65)
- 21 Chen Hai-Peng, Shen Xuan-Jing, Lv Ying-Da, Jin Yu-Shan. Blind identification for image authenticity based on Lambert illumination model. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, **48**(7): 1237–1245  
(陈海鹏, 申铎京, 吕颖达, 金玉善. 基于 Lambert 光照模型的图像真伪盲鉴别算法. 计算机研究与发展, 2011, **48**(7): 1237–1245)
- 22 Sun Peng, Yang Hong-Chen, Dai Xue-Jing, Shen Zhe. An authentication method for splicing images with color temperature estimation. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, **24**(9): 1193–1196  
(孙鹏, 杨洪臣, 代雪晶, 沈轶. 拼接篡改图像的色温估计取证方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, **24**(9): 1193–1196)
- 23 de Carvalho T J, Riess C, Angelopoulou E, Pedrini H, de Rezende Rocha A. Exposing digital image forgeries by illumination color classification. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2013, **8**(7): 1182–1194
- 24 Gijssenij A, Lu R, Gevers T. Color constancy for multiple light sources. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(2): 697–707
- 25 Nakano N, Nishimura R, Sai H, Nishizawa A, Komatsu H. Digital still camera system for mega pixel CCD. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, **44**(3): 581–586
- 26 Lee J S, Jung Y Y, Kim B S, Ko S J. An advanced video camera system with robust AF, AE, and AWB control. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2001, **47**(3): 694–699
- 27 Zhou Rong-Zheng, He Jie, Hong Zhi-Liang. Adaptive algorithm of auto white balance for digital camera. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, **17**(3): 529–533  
(周荣政, 何捷, 洪志良. 自适应的数码相机自动白平衡算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, **17**(3): 529–533)
- 28 Christlein V, Riess C, Jordan J, Riess C, Angelopoulou E. An evaluation of popular copy-move forgery detection approaches. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, **7**(6): 1841–1854
- 29 Ng T T, Hsu J, Chang S F. Columbia image splicing detection evaluation dataset [Online]. available: <http://www.ee.columbia.edu/ln/dvmm/downloads/AuthSplicedDataSet/AuthSplicedDataSet.htm>, July 12, 2018



**孙 鹏** 中国刑事警察学院声像资料检验技术系副教授. 2009 年获得东北大学博士学位. 中科院自动化研究所博士后. 主要研究方向为数字图像取证, 智能监控技术. 本文通信作者.

E-mail: sunpeng\_sx@cipuc.edu.cn

**(SUN Peng** Associate professor in the Audio-Visual and Image Technology Department, Criminal Investigation Police University of China. He received his Ph. D. degree from Northeastern University in 2009. Postdoctor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers digital image forensics and intelligent surveillance. Corresponding author of this paper.)



**郎宇博** 中国刑事警察学院声像资料检验技术系讲师. 2012 年获得东北大学硕士学位. 主要研究方向为数字图像取证, 视频侦查技术.

E-mail: langyubo@cipuc.edu.cn

**(LANG Yu-Bo** Lecturer in the Audio-Visual and Image Technology Department, Criminal Investigation Police University of China. He received his master degree from Northeastern University in 2012. His research interest covers digital image forensics and video investigation.)



**樊 舒** 中国刑事警察学院声像资料检验技术系讲师. 2007 年获得北京邮电大学硕士学位. 主要研究方向为无线网络资源分配与管理.

E-mail: fanshufs@sina.com

**(FAN Shu** Lecturer in the Audio-Visual and Image Technology Department, Criminal Investigation Police University of China. He received his master degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2007. His research interest covers resource allocation and management in wireless networks.)



**沈 喆** 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院自动化系讲师. 2012 年获东北大学博士学位. 中科院沈阳自动化所博士后. 主要研究方向为控制系统故障诊断, 监控视频异常事件检测.

E-mail: angelzheshen@163.com

**(SHEN Zhe** Lecturer in the Department of Automation, School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University. She received her Ph. D. degree from Northeastern University in 2012. Postdoctor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Her research interest covers fault detection of control system, and abnormal event detection of surveillance video.)



**彭思龙** 中国科学院自动化研究所研究员. 1998 年获得中国科学院数学所博士学位. 主要研究方向为小波分析及其在图像处理中的应用, 信号处理.

E-mail: silong.peng@ia.ac.cn

**(PENG Si-Long** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from the Institute of Mathematics, Chinese Academy of Sciences in 1998. His research interest covers wavelet analysis and its application in image processing, signal processing.)



**刘 磊** 中国刑事警察学院声像资料检验技术系研究生. 主要研究方向为数字图像取证, 智能监控技术.

E-mail: liulei2015110057@163.com

**(LIU Lei** Master student in the Audio-Visual and Image Technology Department, Criminal Investigation Police University of China. His research interest covers digital image forensics and intelligent surveillance.)