

# 基于曲率尺度空间角点检测的交通标志分离算法

李厚杰<sup>1,2</sup> 邱天爽<sup>1\*</sup> 宋海玉<sup>3</sup> 王培昌<sup>2</sup> 王鹏杰<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024

<sup>2</sup>大连民族学院 信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116605

<sup>3</sup>大连民族学院 计算机科学与工程学院, 辽宁 大连 116605

**摘要** 针对交通标志出现互连现象导致检测率下降的问题,提出了一种基于曲率尺度空间(CSS)角点检测的交通标志分离算法。使用基于红绿蓝(RGB)归一化的彩色分割算法和区域特征判决准则自动识别多标志互连候选区域,并对提取的目标区域进行边缘平滑和轮廓跟踪。利用基于全局和局部曲率特性的CSS角点检测器对提取的轮廓进行角点检测,并依据角点凸凹性判定准则及分离点对匹配条件,从角点中提取标志间的分离点对。利用Bresenham算法寻求分离点对间的分离线,实现标志的最终分离。实验结果验证了算法的有效性,与现有基于分水岭变换的标志分离算法以及改进的自适应分离算法相比,克服了标志过度分离问题,提高了标志检测整体性能。

**关键词** 图像处理;机器视觉;交通标志分离;曲率尺度空间;角点检测;自适应分离

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0115002

## Separation Algorithm of Traffic Signs Based on Curvature Scale Space Corner Detection

Li Houjie<sup>1,2</sup> Qiu Tianshuang<sup>1</sup> Song Haiyu<sup>3</sup> Wang Peichang<sup>2</sup> Wang Pengjie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology,  
Dalian, Liaoning 116024, China

<sup>2</sup>College of Information and Communication Engineering, Dalian Nationalities University,  
Dalian, Liaoning 116605, China

<sup>3</sup>School of Computer Science and Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116605, China

**Abstract** In view of the detection rate degradation of traffic sign due to multiple signs interconnection, a separation algorithm based on curvature scale space (CSS) corner detection is proposed. The candidate regions of multiple signs interconnection are automatically identified based on red green blue (RGB) normalization color segmentation algorithm and region feature decision criterion. The edge smoothing and contour tracking for the extracted target region are performed. For the obtained contour, the corner detection by using the CSS corner detector based on global and local curvature properties is conducted. And according to the criterion for judging the convexity-concavity of corner and separation points pair matching condition, the separation points pair between the interconnection traffic signs is extracted from the detected corners. The separation line between the separation points pair is achieved by adopting Bresenham algorithm, thus the traffic signs are separated by using the line. Experimental results verify the effectiveness of our method. The proposed method overcomes the problem of the traffic signs over-separation and improves the overall detection performance compared with the existing separation algorithm based on watershed transform and the improved adaptive separation algorithm.

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(81241059, 61172108, 61139001, 61300089)、国家科技支撑计划(2012BAJ18B06)、辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2014540)、国家民委科研项目(12DLZ011)、中央高校基本科研基金(DC110313, DC120101073)

作者简介: 李厚杰(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事机器视觉、交通标志检测与识别技术等方面的研究。

E-mail: lihoujie@sina.com

\*通信联系人。E-mail: qiutsh@sohu.com

**Key words** image processing; machine vision; separation of traffic signs; curvature scale space; corner detection; adaption separation

**OCIS codes** 150.1135; 100.2000; 040.1880; 330.1690

## 1 引 言

交通标志识别系统(TSR)是驾驶辅助、交通标志维护以及无人驾驶等智能交通系统的重要子系统,而交通标志检测是TSR的关键步骤<sup>[1]</sup>,其性能优劣直接决定了TSR的识别结果<sup>[2-3]</sup>。近年来,众多国内外学者提出了许多交通标志检测算法,主要利用了机器视觉的先进方法和技术<sup>[2]</sup>。这些标志检测算法主要分为:基于颜色模型的标志检测<sup>[4-5]</sup>、基于形状特征的标志检测<sup>[6-7]</sup>以及基于模板和机器学习的标志检测算法<sup>[8-9]</sup>等。每类交通标志都有其特定的颜色和形状,是交通标志最为直观的特征,所以基于颜色模型和形状特征的标志检测是两类主流的检测算法,且两类算法往往相互融合。

基于颜色模型的检测算法通常利用颜色模型实现彩色分割,提取特定颜色的候选标志区域,再根据约束条件进行标志筛选,实现标志的检测。只通过颜色信息进行标志检测通常会存在大量的虚警情况,而结合标志的形状特征进一步判定,是众多检测算法的首选<sup>[2,4]</sup>。但这类标志检测算法在彩色分割后,当多个标志水平或者垂直地排列在一起时,可能会面临多个标志(通常2~3个)不同程度地互连或者互相遮挡的问题,在分割后的二值图像中表现为多个标志形成一个连通区域,这样在后续基于交通标志约束条件进行筛选或基于形状特征进一步判定时,因被误判为非标志区域而直接滤除,从而造成一些交通标志的漏检,导致标志检测率的下降。因此,如何有效分离互相连接或互相遮挡的标志,对提高交通标志的检测性能至关重要。目前,交通标志检测算法对此研究较少,Thanh等<sup>[10]</sup>提出了两种分离算法:第一种算法利用了互相连接的多标志内部区域之间往往存在不连通的特性进行分离,但当遮挡程度高时,分离将会失败;第二种算法基于分水岭变换进行分离,不再受遮挡程度的约束,但这种算法是对整幅图像进行处理,无论是否存在需要分离的多标志区域,都会进行同样的处理,计算成本大大增加。而且,当互相遮挡的标志外轮廓存在不连续时,因孔洞填充失效导致标志被丢弃,降低了整体检测性能。针对文献[10]存在的问题,文献[11]提出了一种基于分水岭变换的自适应分离改进算法,仅对候选互连多标志区域进行自适应分离处理,而不是面向整幅图像,有效降低了计算开销,并基于形态学膨胀运算提高了空洞填充性能,再通过分水岭变换实现标志的分离,取得了较好的效果,提高了整体检测性能。但同时,基于分水岭变换的分割算法因存在过分割问题,标志分离有时会出现过度分离现象,造成标志分离的不稳定性。

针对以上问题,研究了互连多标志区域外轮廓角点特性,提出了基于角点检测的标志分离新思路。角点作为图像的一个局部特征,在图像匹配、目标跟踪、目标检测等计算机视觉领域得到了广泛的应用,而角点检测是这些应用的关键,许多学者进行了深入的研究并提出了一些角点检测算法,比如Harris角点检测算法<sup>[12]</sup>、基于曲率尺度空间的角点检测算法<sup>[13]</sup>等。曲率尺度空间(CSS)用于反映平面曲线曲率发生重大变化的图像特征<sup>[14-16]</sup>,在角点检测中得到了广泛关注。Mokhtarian等<sup>[13]</sup>提出了基于曲率尺度空间的角点检测算法,取得了一定的角点检测效果,但也存在单一高尺度造成角点漏检和固定全局阈值对结果影响大的问题。为此,Mokhtarian等<sup>[17]</sup>进一步提出了加强的曲率尺度空间角点检测算法,检测性能有所改善。He等<sup>[18]</sup>提出了基于全局和局部曲率特性的CSS角点检测算法,对文献[17]算法组做了进一步的改进,取得很好的效果。

本文针对多标志连接处外轮廓存在凹性角点特征,提出了一种基于曲率尺度空间角点检测的交通标志分离算法。该算法通过基于全局和局部曲率特性的CSS角点检测器,结合角点凹凸性判定准则及分离点对匹配判决,有效提取了互连标志外轮廓连接处的分离点对并寻求分离线,实现标志的有效分离,而对不满足凹性角点判定准则及分离点匹配条件的角点不做分离处理,较好地克服了标志过度分离问题。同时,在标志分离及整体检测性能方面,取得了较好的效果,优于现有基于分水岭变换的分离及自适应改进算法。

## 2 CSS角点检测

Mokhtarian等<sup>[13]</sup>提出了CSS技术,对于一条平面曲线 $l$ ,不同尺度 $\sigma$ 下的曲率为

$$K(t, \sigma) = \frac{\dot{X}(t, \sigma)\ddot{Y}(t, \sigma) - \ddot{X}(t, \sigma)\dot{Y}(t, \sigma)}{[\dot{X}(t, \sigma)^2 + \dot{Y}(t, \sigma)^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

式中  $t$  是弧长参数,  $\sigma$  是尺度参数,  $\dot{X}(t, \sigma)$ 、 $\dot{Y}(t, \sigma)$ 、 $\ddot{X}(t, \sigma)$ 、 $\ddot{Y}(t, \sigma)$  分别为曲线  $l$  上一点的坐标  $x(t)$  和  $y(t)$  与一维高斯核函数  $g(t, \sigma)$  的一阶导数和二阶导数的卷积。

文献[18]提出了基于全局和局部曲率特性的 CSS 角点检测算法, 算法利用(1)式在一个固定较低的尺度下计算出轮廓曲线曲率, 再根据曲率局部最大检测出所有的候选角点(包括圆角点和虚假角点)。算法给出了圆角点判定

$$R_c = \begin{cases} 1, & K(u) \leq T(u) \\ 0, & \text{other} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $u$  为候选角点的位置参数,  $K(u)$  是候选角点的曲率,  $T(u)$  为与角点支持域自适应的动态局部阈值。当  $R_c=1$  时表示角点为圆角点, 给予滤除。

对于虚假角点, 可依据虚假角点评判准则进行判定

$$C_c \text{ is } \begin{cases} \text{true corner,} & \angle C_c \leq \theta_{\text{obtuse}} \\ \text{false corner,} & \angle C_c > \theta_{\text{obtuse}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $C_c$  为需要判定的候选角点,  $\angle C_c$  为角点  $C_c$  的角,  $\theta_{\text{obtuse}}$  为真正角点的最大钝角值, 通常  $\theta_{\text{obtuse}} = 160^\circ$ 。这样, 从初始检测到的候选角点中滤除掉圆角点和虚假角点, 就可得到最终检测的真正角点。详细内容请参阅文献[18]。

### 3 基于 CSS 角点检测的分离算法

#### 3.1 图像预处理

为了从彩色交通标志图像中提取标志候选区域, 要进行二值化处理。利用交通标志的颜色信息, 基于红绿蓝(RGB)归一化阈值分割算法<sup>[4]</sup>对交通标志图像实施分割, 获取凸显交通标志候选区域的二值图像。

为了提高计算效率, 本算法仅对互相连接或互相遮挡的多标志候选区域进行分离处理, 避免了文献[10]分离算法对整幅图像实施处理所带来的大量不必要的计算开销。为此, 构造区域特征矢量  $V_F = (P_n, A_{\text{rect}}, A, S_{\text{min}})$ , 其中  $P_n$  为二值图像 8 连通区域中值为 1 的像素个数;  $A_{\text{rect}}$  是交通标志候选区域最小外接矩形的面积;  $A$  为最小外接矩形的纵横比;  $S_{\text{min}}$  为最小外接矩形的最小边。考虑到交通标志的尺寸是有限的, 根据经验可以获取单个交通标志区域特征矢量阈值  $V_{\text{Sth}} = (P_{n, \text{Sth}}, A_{\text{Sth}}, A_{r, \text{Sth}}, S_{\text{min}, \text{Sth}})$  和多个互连交通标志区域的特征矢量阈值  $V_{\text{Mth}} = (P_{n, \text{Mth}}, A_{\text{Mth}}, A_{r, \text{Mth}}, S_{\text{min}, \text{Mth}})$ 。对于标志候选区域  $R_c$  而言, 则可通过区域判决准则把区域分为三类: 对于单标志候选区域(当  $V_F \in V_{\text{Sth}}$  时)无需分离, 直接判定为标志或基于形状特征进一步降低虚警率; 对于虚警区域则直接丢弃不予考虑; 而对多标志候选区域(当  $V_F \in V_{\text{Mth}}$  时)则直接提取并进行分离。

针对提取的多标志候选区域可能存在边缘轮廓不连续、边缘不平滑等问题, 提出了基于数学形态学的边缘接续和边缘平滑的处理算法, 步骤为:

1) 边缘接续处理。设多标志候选区域为  $R_{\text{can}}$ , 圆盘型结构元素为  $S$ , 利用形态学闭运算使断裂的边缘趋于连续, 同时避免了膨胀算子所造成的过度变粗问题。处理结果为

$$R_c = (R_{\text{can}} \oplus S) \ominus S, \quad (4)$$

式中  $\oplus$  和  $\ominus$  分别表示膨胀和腐蚀运算;

2) 内部区域填充。为在轮廓跟踪中, 避免标志内部区域的干扰曲线造成虚假跟踪, 对接续后的区域  $R_c$  实施孔洞填充处理, 处理后区域为

$$X_k = (X_{k-1} \oplus S_f) \cap R_c^c, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

$$R_f = R_c \cup X_k, \quad (6)$$

式中  $X_0 = p$ ,  $p$  为区域  $R_c$  内填充起始点,  $S_f$  为一个对称结构元素,  $R_c^c$  是  $R_c$  的补集。当  $X_k = X_{k-1}$  时, 迭代结束;

3) 边缘平滑处理。利用形态学开运算算子对  $R_f$  进行平滑处理, 可有效滤除边缘噪声和细节干扰, 处理

后区域为

$$R_s = (R_i \ominus S) \oplus S. \quad (7)$$

### 3.2 角点检测

角点检测是对边缘曲线而言的,因此边缘轮廓跟踪和提取是一个非常重要的步骤<sup>[19-20]</sup>。使用Freeman链码<sup>[21]</sup>轮廓跟踪算法对低维数的多标志候选区域进行轮廓提取。设提取的经过平滑处理的多标志候选区域 $R_s$ 子图像为 $I_{sub}$ ,再通过形态学腐蚀处理,可提取到标志区域的边缘轮廓曲线二值图像 $I_c$ 。对 $I_c$ 进行列扫描,寻找到第一个为“1”的点,记为 $P_s(x_s, y_s)$ ,其中 $(x_s, y_s)$ 为其坐标。以 $P_s$ 为跟踪起点,按照链码值[3 2 1 0 7 6 5 4]顺序扫描 $P_s$ 的8个邻点,当扫描到值为“1”的点,即可确定为 $P_s$ 的边缘后继像素点,记为 $Q$ ,并把其坐标存储到轮廓点坐标列表中,同时,停止对其他邻域点扫描判断。再以 $Q$ 为新的起点,按照同样的方法依次跟踪轮廓点,当 $Q$ 点与 $P_s$ 重合时,跟踪结束,这样所有存储点的坐标集合就构成了多标志区域边缘轮廓。

当获得轮廓坐标信息后,则使用CSS角点检测算法<sup>[18]</sup>对边缘曲线实施角点检测。本算法与文献[18]提出的算法不同之处在于,文献[18]算法步骤1和步骤2分别采用了canny边缘检测器和CSS轮廓提取方法进行边缘检测和轮廓提取,而本算法则根据交通标志图像的自身特性采用了如前所述的基于RGB归一化彩色分割的边缘检测和基于Freeman链码的轮廓跟踪算法。提取的轮廓表示为

$$O_p = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}, \quad (8)$$

式中 $P_j=(x_j, y_j)$ 为轮廓像素, $(x_j, y_j)$ 为轮廓像素坐标, $N$ 是轮廓像素点的个数。

1) 轮廓高斯平滑:轮廓与高斯核 $g$ 卷积运算

$$A_{smooth} = O_p \otimes g, \quad (9)$$

式中 $g$ 为数字高斯函数,宽度取决于参数 $\sigma_{ol}$ (本算法中 $\sigma_{ol}=3$ ), $A_{smooth}$ 为平滑结果。

2) 初始角点检测:根据(1)式计算出每个轮廓像素点的曲率,提取曲率局部最大值的点作为候选角点,得候选角点集合 $C_{set} = \{P_{c1}, P_{c2}, \dots, P_{cZ}\}$ , $Z$ 是候选角点的个数。

3) 圆角点判决与滤除:根据(2)式对所有候选角点进行圆角点判决,若满足圆角点条件,则给予滤除。

4) 虚假角点判决与滤除:依据(3)式虚假角点判决准则,检测出虚假角点并进行滤除。最终检测的角点集合为 $C_{true} = \{P_{t1}, P_{t2}, \dots, P_{tK}\}$ , $K$ 是检测到的角点个数。

### 3.3 分离点提取和标志分离

分析发现,在多标志连接处存在角点,且呈现凹特性,而通过相对应的两个凹性角点可实现标志分离。基于这一思想,提出角点凸凹性判定准则,进而提取分离点,并实现分离点对匹配。

图1(a)是一个三角形标志和圆形标志互连的多标志二值图像,通过轮廓跟踪算法,得到轮廓边缘点序列图像,如图1(b)所示。对于每个角点,如角点 $A$ ,检索到其等间距的前向点 $B$ 和后向点 $C$ ,设向量 $AB$ 和向量 $AC$ 与水平方向的角分别为 $\delta_1$ 和 $\delta_2$ ,则角点 $A$ 的角为

$$\angle A = |\delta_2 - \delta_1|, \quad (10)$$

分离点判决准则为

$$A \text{ is } \begin{cases} \text{candidate separation point, if } \angle A < \varphi_{thre} \\ \text{no-separation point, otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 $\varphi_{thre}$ 是判定阈值,取值为 $180^\circ$ 。显然, $A$ 和 $M$ 点具有分离点的特性,而 $D$ 点则为非分离点。

对所有候选分离点进行点对匹配,匹配条件为:

- 1) 两个候选分离点间连线的延长线,能够贯穿每个候选点与前向点和后向点所形成的向量扇区;
- 2) 两个候选分离点连线构成直线 $L$ ,直线 $L$ 的斜率绝对值所对应第一象限角为 $\varphi$ ,则 $\varphi \in [0^\circ \sim 10^\circ] \cup [80^\circ \sim 90^\circ]$ 。

其中,第二个条件考虑了互连的交通标志理想状态下为水平排列或垂直排列的事实。若以上两个条件同时满足,则两个候选分离点为真实分离点,且为匹配分离点对。对每一个匹配分离点对,使用Bresenham直线算法<sup>[22]</sup>寻求分离线。Bresenham直线算法基本原理是过各行、各列像素中心构造一组虚拟网格线,按直



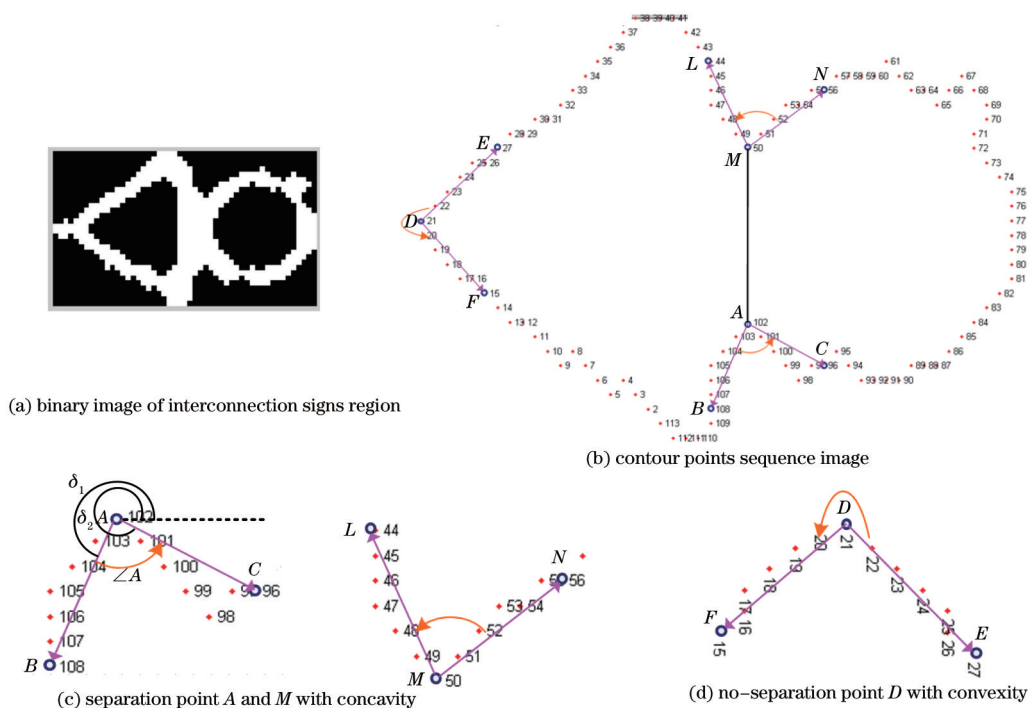


图1 分离点判决

Fig.1 Decision of separation point

线从起点到终点(即确定的两个分离点)的顺序计算直线与各垂直网格线的交点,以起始点开始,利用步进思想和依据交点与候选点之间的误差项可依次确定下一个点的位置。算法通过直线线段的斜率确定单位步进的方向:当斜率 $k$ 的绝对值 $|k| < 1$ 时,在 $x$ 方向进行单位步进;当斜率 $k$ 的绝对值 $|k| > 1$ 时,在 $y$ 方向进行单位步进。不失一般性,假设线段位于第一象限(根据对称性,可以推广到其他各个象限),且斜率 $0 < k < 1$ ,设线段方程为 $y = k \cdot x + m$ ,起始点为 $(x_1, y_1)$ 。在 $x$ 方向单位步进,判断是否达到终点,如果是,则完成;否则,计算直线线段与 $x = x_1 + 1$ 之间的交点坐标 $(x_1 + 1, y_{inter})$ 。计算误差项 $D_{error} = y_{inter} - (y_1 + 0.5)$ ,如果 $D_{error} \geq 0$ ,则下一个点的坐标为 $(x_1 + 1, y_1 + 1)$ ;否则,坐标为 $(x_1 + 1, y_1)$ 。按照同样方法可依次确定下一个点,直至终点,这样就可以获取分离点对之间线段上各个像素点坐标。

利用Bresenham算法寻求的分离线可以实现互连标志的最终分离,通过区域特征矢量对分离后的区域进行候选交通标志再确认,对于满足单标志区域特征的区域保留,否则,给予丢弃。

#### 4 实验结果与分析

为了检验本算法的有效性,以德国交通标志检测数据集GTSDB中含有红色信息的交通标志进行实验测试,数据集GTSDB包括训练集TrainIJCNN2013和测试集TestIJCNN2013共900幅交通标志图像。在数据集中,标志的尺寸范围为16 pixel  $\times$  16 pixel至128 pixel  $\times$  128 pixel,结合实验测试,单个标志的最小外接矩形的面积阈值 $A_{sth}$ 确定为[260, 20000]。对于多个互连标志,考虑为2至3个标志,并结合实验测试,可以设置 $A_{Mth}$ 为[512, 25000];对于标志最小外接矩形的最小边,显然 $S_{min, Sth}$ 和 $S_{min, Mth}$ 都应为16 pixel;而对于标志外接矩形的纵横比,考虑到标志的形状及标志的排列方式,单个标志的 $A_{r, Sth}$ 为[0.8, 1.3],多个标志的 $A_{r, Mth}$ 为[[1.4, 2.3], [2.6, 3.2]];为了既达到消除干扰,又防止漏检,并结合实验测试, $P_{n, Sth}$ 和 $P_{n, Mth}$ 确定为80 pixel。综上,实验中单个交通标志区域特征矢量阈值 $V_{sth} = \{80 [260, 20000] [0.8, 1.3] 16\}$ ,多个互连交通标志区域的特征矢量阈值 $V_{Mth} = \{80 [512, 25000] [[1.4, 2.3], [2.6, 3.2]] 16\}$ 。另外,基于数学形态学的边缘接续和边缘平滑的处理算法中的结构元素参数 $S$ ,采用了Matlab软件IPT函数strel生成的半径为2的圆盘型结构元素。实验以CPU 2.8-GHz、内存1.99-GB的个人PC机为硬件平台,Windows XP操作系统为软件平台,使用Matlab2010b进行仿真。

进行分离效果对比实验,将不分离、文献[10]基于分水岭变换的分离算法、文献[11]分离算法以及本算法进

行比较,实验结果如图2所示。图2(a)为原始交通图像,为了改善视觉效果,对交通标志区域进行了局部放大,如图2(b)所示。图2(c)为图2(b)分割后的二值图像,从图2(b)和2(c)可以观察到50限速标志和禁止超车标志连通在一起,导致两个标志形成一个区域,不符合单个交通标志的区域特征,被误判为非标志区域而丢弃,导致50限速标志和禁止超车标志检测不到,从而降低了系统检测率,如图2(d)所示。为此,文献[10]提出了基于分水岭变换对互连标志或互相遮挡标志进行分离的算法,该算法在分离之前,需要进行空洞填充预处理,但当标志外轮廓存在不连续时,填充失败,在后续基于分水岭变换进行分离时,出现了错误分离,如图2(e)所示,从而导致标志分离失效,无法检测到标志,如图2(f)所示。

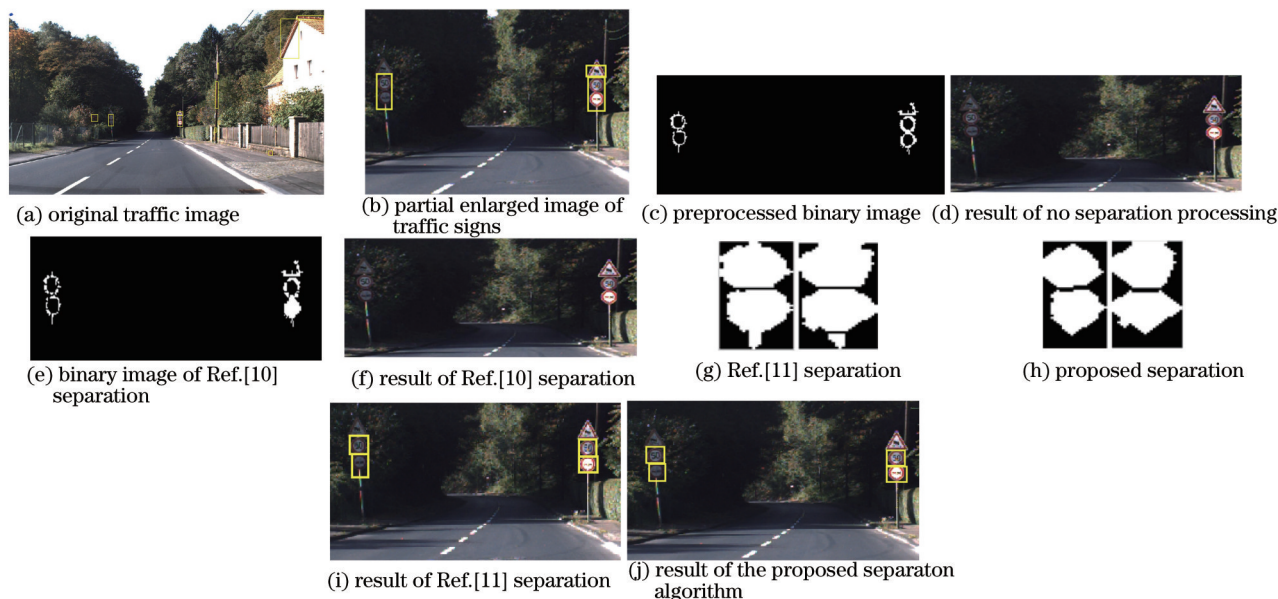


图2 互连交通标志分离对比实验结果

Fig.2 Separation comparison of interconnection traffic signs

本文在文献[11]中针对文献[10]存在的问题,提出了自适应分离改进算法,不再对整幅图像进行分离处理,而是通过提出的区域判决准则提取多标志区域,仅对多标志区域进行了分离处理,并利用数学形态学算子进行平滑预处理,不仅提升了算法的执行效率,而且提高了空洞填充率,进而实现了标志间的有效分离,提高了检测性能,如图2(g)和2(i)所示。但同时也注意到文献[11]分离出现了过度分离现象,如图2(g)所示。本算法保留了自适应思想,优化了边缘接续和边缘平滑处理,利用多标志连接处外轮廓存在凹性角点特征,实现了标志的有效分离,取得了较好的效果,解决了文献[11]出现的过度分离问题,如图2(h)和(j)所示。同时,比较图2(g)和(h)可以发现,本算法分离后的标志外轮廓更加光滑,检测到的标志区域更准确。

图3为交通标志自适应性分离实验结果,从图3(c)可以看到,虽然禁止超车标志与70限速标志之间不存在互连关系,但由于文献[10]分离算法是对整幅图像进行处理,不具有标志区域属性的识别能力,仍然对禁止超车标志进行了不必要的处理。而文献[11]和本算法仅对具有互连的70限速标志和反向弯路标志进行分离处理,如图3(d)和3(f)所示,体现了较好的自适应能力。同时,从图3(d)可以看到,文献[11]分离中反向弯路标志也出现了过度分离现象,可能会影响后续的标志识别。

为了进一步客观评价提出的分离算法在标志检测中的有效性,把分离处理作为整体标志检测中的一个重要阶段进行检测实验。在标志检测中,采用了文献[23]中提出的基于径向对称变换的禁止标志检测算法,对具有红色圆环特征的禁止标志进行检测。基于本分离算法的标志检测实验部分结果如图4所示,为三组实验结果图像,每一组第一幅是未进行标志分离的结果,第二幅为标志分离并进行检测的结果。从实验结果可以观察到,本算法较好地实现了分离并有效地应用到了标志检测中。

同时,在标志检测中对各个分离算法的性能进行了比较,比较结果如表1所示。其中, $T_p$ 为交通标志真正数,即检测结果中交通标志的数量; $F_n$ 为交通标志假负数,即没有被检测出的交通标志数; $F_p$ 为交通标志

假正数,即不是标志而被检测为标志的数量; $R$ 为正确检测率,是正确检测出标志数量占总标志数的百分率; $F_{ppf}$ 每幅图像平均假正率; $T_A$ 为每幅图像平均处理时间。从表1可以看出,本算法下的检测率比未进行分离时的检测率提高了12.19%,比文献[10]提高了7.35%,也高于文献[11]分离算法下的检测率;在每帧平均处理速度上比文献[10]提升了3.5倍多,也略快于文献[11]。所以,在算法执行效率、检测性能以及检测区域的准确度等整体检测性能方面,本算法要优于现有算法。

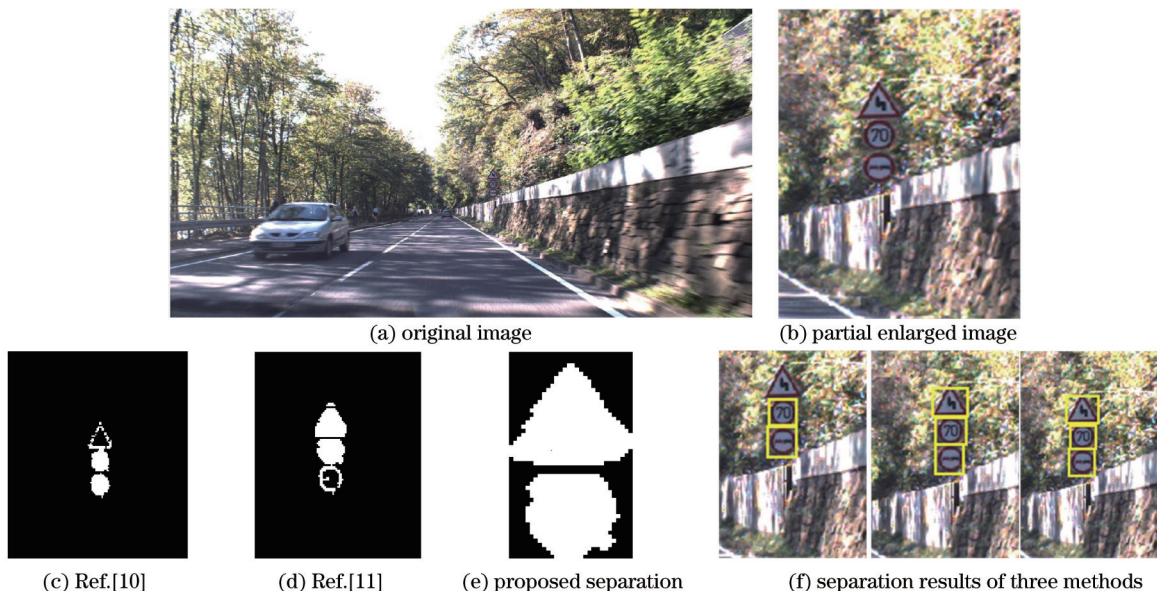


图3 交通标志自适应分离实验结果。

Fig.3 Experimental results of traffic signs adaptive separation



图4 标志检测结果

Fig.4 Results of traffic signs detection

表1 互连标志分离检测性能比较结果

Table 1 Performance comparison of interconnection signs separation

Method	$T_p$	$F_N$	$F_p$	$R/\%$	$F_{ppf}$	$T_A$
No-separation	446	112	151	79.92	0.168	0.426
Ref.[10] separation	473	85	194	84.76	0.216	1.617
Ref.[11] separation	508	50	214	91.04	0.238	0.472
Proposed method	514	44	189	92.11	0.210	0.461

与文献[11]相比较,本算法克服了标志过度分离的问题,在整体检测应用中,检测整体性能有所提高。但同时也看到,作为主要检测评价指标的正确检测率提高不明显,仅为1.07%。其主要原因在于:在算法图像预处理基于RGB归一化彩色分割时,由于有些标志处于复杂的红色背景下,很难从背景中提取出来,造成漏检;另外,由于有些标志被背景其他物体严重遮挡或者标志严重褪色等原因,边缘轮廓出现严重断裂,可能被误判为非标志区域被丢弃;第三个主要原因是在基于径向对称变换进行标志检测时,由于某些被检测的标志外接矩形区域内干扰严重,导致不满足圆形标志形状特征而造成漏检。如何优化颜色分割算法性



能、进一步改善边缘连续性和优化基于径向对称变换的标志检测算法将是下一步的研究重点。

## 5 结 论

提出的基于曲率空间角点检测的多标志分离算法,充分利用了多标志外轮廓存在凹特性角点的特性,较好地实现了互连标志的分离。算法仅对满足凹性角点判定准则及分离点匹配条件的角点进行分离处理,而对于不满足要求的角点进行滤除,不实施分离处理,较好地克服了标志过度分离问题。实验结果验证了本算法的有效性,在标志检测应用中,整体检测性能优于与现有分离算法。

## 参 考 文 献

- 1 Hou Peiguo, Chen Yiqiang, Zhang Bei. Research on road traffic sign identification algorithm based on invariance association neural network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(6): 061001.  
侯培国,陈毅强,张 北. 基于不变性联想神经网络的道路交通标志识别算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(6): 061001.
- 2 A Mogelmoose, M M Trivedi, T B Moeslund. Vision-based traffic sign detection and analysis for intelligent driver assistance systems: Perspectives and survey [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transport System*, 2012, 12(4): 1484-1496.
- 3 M Y Fu, Y S Huang. A survey of traffic sign recognition [C]. *IEEE Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, 2010. 119-124.
- 4 H G Moreno, S M Bascon, P GilJimenez, *et al.*. Goal evaluation of segmentation algorithms for traffic sign recognition [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transport System*, 2010, 11(4): 917-930.
- 5 Wang Nan, Liu Wei, Chen Xue, *et al.*. System for road sign detection, recognition and tracking based on multi-cues hybrid [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(8): 1277-1280.  
王 楠,刘 威,陈 雪,等. 基于多线索混合的交通标志检测与跟踪[J]. *控制与决策*, 2010, 25(8): 1277-1280.
- 6 N Barnes, A Zelinsky, L Fletcher. Real-time speed sign detection using the radial symmetry detector [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transport System*, 2008, 9(2): 322-332.
- 7 A Gonzalez, M Garrido, D Llorca, *et al.*. Automatic traffic signs and panels inspection system using computer vision [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transport System*, 2011, 12(2): 485-499.
- 8 X Baro, S Escalera, J Vitria, *et al.*. Traffic sign recognition using evolutionary adaboost detection and forest-ECOC classification [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transport System*, 2009, 10(1): 113-126.
- 9 I M Creusen, R G J Wijnhoven, E Herbschleb, *et al.*. Color exploitation in hog-based traffic sign detection [C]. *IEEE Image Processing*, 2010. 2669-2672.
- 10 T B Minh, O Ghita, P F Whelan, *et al.*. Two algorithms for detection of mutually occluding traffic signs [C]. *IEEE Automation and Information Sciences*, 2012. 120-125.
- 11 Li Houjie, Qiu Tianshuang, Song Haiyu, *et al.*. Adaptive separation of mutually occluding traffic signs based on watershed transformation [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2014, 54(1): 100-105.  
李厚杰,邱天爽,宋海玉,等. 基于分水岭变换的互相遮挡交通标志自适应分离[J]. *大连理工大学学报*, 2014, 54(1): 100-105.
- 12 Chen Hui, Mi Baoxiu, Gao Zhiqiang. Calibration of 3D structured light measurement system based on the properties of lens distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1215002.  
陈 会,密保秀,高志强. 基于畸变规律的三维结构光测量系统标定 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1215002.
- 13 F Mokhtarian, R Suomela. Robust image corner detection through curvature scale space [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(12): 1376-1381.
- 14 F Mokhtarian, M Bober. *Curvature Scale Space Representation: Theory, Applications, and MPEG-7 Standardization* [M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2011.
- 15 Cheng Gong, Guo Lei, Han Junwei, *et al.*. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1015001.  
程 焱,郭 雷,韩军伟,等. 基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1015001.
- 16 Guo Lingling, Zhang Xingxiang, Ren Jianyue, *et al.*. Method to measure the radius of curvature of conic of off-axis aspheric mirror using laser tracker [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 091202.  
郭玲玲,张星祥,任建岳,等. 激光跟踪仪测量二次离轴非球面曲率半径的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 091202.



- 17 F Mokhtarian, F Mohanna. Enhancing the curvature scale space corner detector [C]. Proceedings of the Scandinavian Conference on Image Analysis, 2001. 145-152.
- 18 X C He, N H C Yung. Corner detector based on global and local curvature properties [J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 057008.
- 19 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. Fast target recognition in ladar using projection contour feature[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0209003.  
郭裕兰, 鲁敏, 谭志国, 等. 采用投影轮廓特征的激光雷达快速目标识别[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209003.
- 20 Gu Cheng, Qian Weixian, Chen Qian, *et al.*. Rapid head detection method based on binocular stereo vision [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108001.  
顾骋, 钱惟贤, 陈钱, 等. 基于双目立体视觉的快速人头检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108001.
- 21 K Li, X W Gao, W B Yang, *et al.*. Multiple fault diagnosis of down-hole conditions of sucker-rod pumping wells based on Freeman chain code and DCA [J]. Petroleum Science, 2013, 10(3): 347-360.
- 22 D Hearn, M P Baker. Computer Graphics with OpenGL (Third Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry Press, 2010. 73-77.  
赫恩, 巴克. 计算机图形学(第3版)[M].北京: 电子工业出版社, 2010. 73-77.
- 23 Li Houjie, Qiu Tianshuang, Song Haiyu, *et al.*. Adaptive prohibitive sign detection based on radial symmetry transform [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(3): 532-539.  
李厚杰, 邱天爽, 宋海玉, 等. 基于径向对称变换的自适应禁止交通标志检测[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3): 532-539.

栏目编辑: 张浩佳