

# 一种空中多目标的定位及识别快速算法

姜涌 曹杰 杜亚玲 李勃  
(南京航空航天大学无人机研究院 南京 210016)

**摘要:** 针对空中多个目标进行精确定位及识别的特殊应用场合, 该文采用了先进的改进不变矩的算法来进行目标的识别。由于不变矩识别对目标轮廓要求很高, 该文提出了一种新的具有方向估计性质的形态学梯度边缘检测算子, 弥补了现行的同类算子无法估计边缘方向的缺点; 将模糊理论引入该算子, 使其更好地抑制噪声, 成功分离目标和背景; 提出了一种新的断点连接及孤点消除的算法, 使目标的轮廓更加清晰平滑, 并用跟踪法找到其单像素轮廓线。实验证明, 这种新算法极大地提高了对空中多个目标的识别率, 并大大加强了系统的可靠性。

**关键词:** 形态学梯度, 模糊理论, 方向估计, 阈值分割, 边缘检测, 不变矩

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)12-1916-06

## A Fast Arithmetic about Positioning and Identifying Multi-targets in Air

Jiang Yong Cao Jie Du Ya-ling Li Bo

(Unmanned Aerial Vehicles Research Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** Aiming at the special situation of positioning and identifying multi-targets in air, this paper has the advanced invariant moment arithmetic to carry out. Because the moments request good quality of identifying, so this paper provides a new morphological gradient image edge detection operator which can estimate orientation, and proves them in theory and practice. There are four element structures with different direction. In these operators, the blurring processing is added, it makes that the operators not only depress the noise in image, but also enhance edge's definition. And then it changes the edge detection image into the binary image through the optimal threshold segmentation. It also shows a new simple arithmetic about jointing broken lines. It does not only make the targets' contour smooth, but also can find the single pixel boundary with tracking. Through kinds of tests, the identifying rate has been improved, and the dependability has been strengthened.

**Key words** Morphological gradient, Blurring theory, Orientation estimate, Threshold segmentation, Edge detection, Invariant moment

### 1 引言

图像处理及识别技术在遥控遥测、航空等方面的应用愈来愈广泛。例如, 对近距离空中目标的、锁定、识别、跟踪, 无人机的自动起飞与回收, 图像处理及识别技术都有着重要的作用。本文采用了比较成熟的改进不变矩的方法进行目标的最后识别。虽然这种方法的识别率很高, 但是它对空中多目标的位置及轮廓的信息要求较高, 所以, 如何有效地对空中多目标定位和提取完整、平滑的轮廓是整个算法的关键。本文利用数学形态学的理论, 结合梯度的概念, 找出一种能迅速达到上述要求的有效算法。

### 2 算法

假设已知的图像是通过电视图像采集 256 色灰度图像, 通常算法要经过目标轮廓的提取和目标的识别两个阶段处理。目标轮廓的提取是要把图中目标与背景分开, 并找出目标的边缘; 目标识别是找出图中的感兴趣目标并精确地确定目标的类型、位置、偏心率等各种参数。图 1 为本算法的系统图。

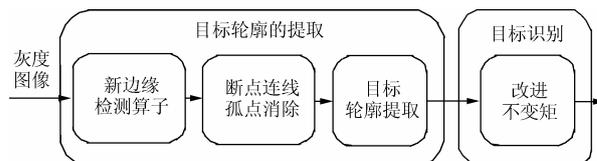


图 1 本算法系统结构图

2.1 新边缘检测算子：OEMG

文章根据空中目标视频图像中背景较单一但噪声影响很大的特点，提出了一种新的具有方向估计的形态学梯度边缘检测算子(OEMG)。

灰度的形态学梯度运算是来自于对灰度膨胀和灰度腐蚀的一些运算。如果令*I*为原始图像，*B*为形态学结构元素，我们定义<sup>[1]</sup>：灰度图像的形态学膨胀和形态学腐蚀分别为

$$f_D(I, B) = (I \oplus B)(s, t) = \max\{I(s-x, t-y) + B(x, y) | (s-x), (t-y) \in D_I \text{ 和 } (x, y) \in D_B\}$$

$$f_E(I, B) = (I \ominus B)(s, t) = \min\{I(s+x, t+y) - B(x, y) | (s+x), (t+y) \in D_I \text{ 和 } (x, y) \in D_B\}$$

则有  $g_D(I, B) = f_D(I, B) - I$ ； $g_E(I, B) = I - f_E(I, B)$ 。由此可以得出比较经典的形态学梯度算法：

$$g_{Sum}(I, B) = f_D(I, B) - f_E(I, B) = g_D(I, B) + g_E(I, B)$$

当 *B* 取 3×3, 5×5 的矩形模板或菱形模板时，就可以很好地将图像的边缘提取出来，而且对噪声的抑制也优于 sobel 等边缘检测算子。如图 2(a)、2(b)、2(c)所示。形态学梯度算法对图像进行边缘检测虽然能较好地检测边缘并抑制噪声的干扰，但是如果遇到图像的边缘较清晰、尖锐，噪声干扰很大时，效果也不是很好。

从图 2(c)可以看出还是有较明显地噪声干扰，如果在进行  $g_{Sum}$  前加上一个模糊 Blurring 过程(本方案选用中值滤波)，效果就比较理，即

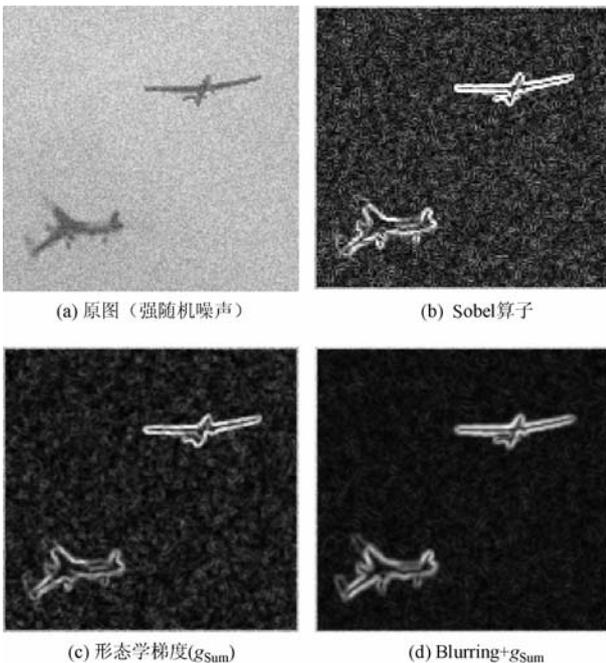


图 2 几种边缘检测算法的比较

$$g_{Sum}(I_B, B) = f_D(I_B, B) - f_E(I_B, B) = g_D(I_B, B) + g_E(I_B, B),$$

式中  $I_B$  表示对 *I* 进行中值滤波。

如图 2 (d) 所示：图像中的噪声得到了较好的抑制，边缘与背景的对比度也增加了。下面用图解的方法描述 OEMG 算法中 Blurring +  $g_{Sum}$  的过程，并从理论上说明原因。如图 3 所示。

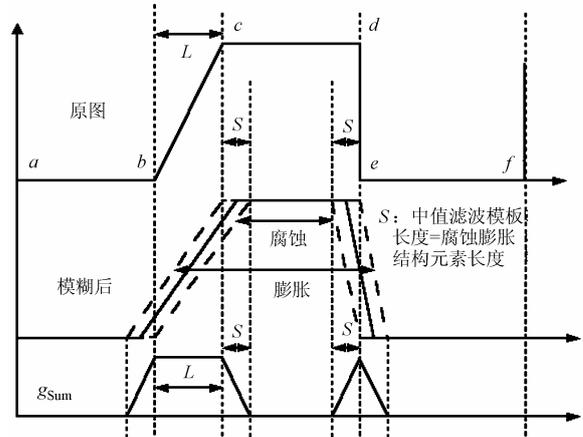


图 3 Blurring 和  $g_{Sum}$  算法过程图解

(1) 原图中 *abcd* 为一斜坡边缘，边缘的宽度为 *L*。 *cdef* 为一阶跃边缘，*f* 为冲击噪声，纵坐标为边缘的幅值。

(2) 经过中值滤波后，边缘的斜率减小，边缘的宽度增加了 *S*(此处 *S* 为中值滤波的模板的长度)，冲击噪声完全被滤除。

(3) 经过  $g_{Sum}$  运算后，图像的边缘被检测出来，其宽度比第 2 步中的边缘宽度又增加了 *S*(此处的 *S* 为腐蚀膨胀结构元素的长度)。这样就是目标的边缘更加的明显，而且不改变目标轮廓的形状。

理论上，图像中边缘是赋给单个像素的性质，用图像函数在该像素一个邻域处的特性来计算。它是一个具有幅值(magnitude)和方向(direction)的矢量(vector variable)<sup>[4]</sup>。它的信息包括两个部分：边缘的幅值(*a*)，边缘的方向( $\theta$ )<sup>[5]</sup>。所以，灰度图像的边缘也可以用下面的公式来表示：

$$f(x, y) = f_0 + a(x\cos\theta + y\sin\theta)$$

其中  $f(x,y)$  为原图像函数， $f_0$  为图像背景的灰度值，*a* 为图像边缘的幅值， $\theta$  为图像边缘的方向。虽然上述的  $g_{Sum}$  算法有了一些几何滤波的性质，但是它只体现了边缘的幅值，没有体现出对边缘方向的估计。

假设图像中的某一小范围区域为同一梯度，即具有相同的  $f_0, a, \theta$ 。那么，其中的一点(*x,y*)的灰度值可表示为

$$f(x, y) = f_0 + a(x\cos\theta + y\sin\theta)$$

如果令  $f_0=0, a=1$ ，它周围的 8 个点可如表 1 所示。以 Sobel 算子这个最典型的具有方向估计的算子为例，它的计算模板如图 4 所示。

表 1 像素(x, y)及邻域表示

$(x-1)\cos\theta+(y-1)\sin\theta$	$x\cos\theta+(y-1)\sin\theta$	$(x+1)\cos\theta+(y-1)\sin\theta$
$(x-1)\cos\theta+\sin\theta$	$x\cos\theta+y\sin\theta$	$(x+1)\cos\theta+y\sin\theta$
$(x-1)\cos\theta+(y+1)\sin\theta$	$x\cos\theta+(y+1)\sin\theta$	$(x+1)\cos\theta+(y+1)\sin\theta$

$B_1$	$B_2$																		
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr> </table>	1	2	1	0	0	0	-1	-2	-1	<table border="1"> <tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
1	2	1																	
0	0	0																	
-1	-2	-1																	
-1	0	1																	
-2	0	2																	
-1	0	1																	

表 2 两组梯度估计量的幅值及方向估计

	梯度幅值估计	梯度方向估计
$g_{Sum}(I_B, B_0)$	$\sqrt{(2\cos\theta)^2+(2\sin\theta)^2}$	$\tan^{-1}(2\sin\theta/2\cos\theta)$
$g_{Sum}(I_B, B_{\pi/2})$	$= 2 = M_{Sum}^{0,\pi/2}$	$= \theta$
$g_{Sum}(I_B, B_{\pi/4})$	$2 \times ((\cos\theta + \sin\theta)^2 + (\cos\theta - \sin\theta)^2)^{1/2}$	$\tan^{-1}\left(\frac{\cos\theta + \sin\theta}{\cos\theta - \sin\theta}\right) - \pi/4 = (\pi/4 + \theta) - \pi/4$
$g_{Sum}(I_B, B_{3\pi/4})$	$= 2\sqrt{2} = M_{Sum}^{\pi/4, 3\pi/4}$	$= \theta$ (坐标系转换)

算法	梯度幅值估计	梯度方向估计
	$M = \sqrt{f^2(I, B_1) + f^2(I, B_2)}$	$\theta = \tan^{-1}(f(I, B_1)/f(I, B_2))$
Sobel	$M_s = \sqrt{(8\cos\theta)^2 + (8\sin\theta)^2} = 8$	$\theta_s = \tan^{-1}(\sin\theta/\cos\theta) = \theta$
形态学梯度	随 $\theta$ 值不同而不同	无法估计

图 4 Sobel 算子模板及梯度幅值方向估计

上述的形态学梯度算法： $g_{Sum}$ ，它们的结构元素是  $3 \times 3$ ， $5 \times 5$  的矩形区域或菱形区域。在这样的区域中找寻出的灰度的最大值或最小值位置不固定，不可能用上述的方法对梯度的幅值和方向进行估计，所以说，形态学梯度滤波器是一种非线性的边缘检测滤波器。笔者根据多结构形态学的思想，提出了能对形态学的梯度方向做出估计的新算法。提出了 4 个  $1 \times 3$  的含有方向信息的结构元素，如图 5 所示。

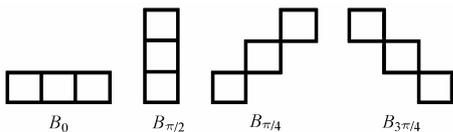


图 5 具有方向估计的形态学边缘检测的结构元素

无论图像中梯度的方向  $\theta$  为何值 ( $\theta \in (0, \pi)$ )， $g_{Sum}(I_B, B)$  必大于零，则  $\theta \in (0, \pi)$  时，  
 $g_{Sum}(I_B, B) = f_D(I_B, B) - f_E(I_B, B)$   
 $= g_D(I_B, B) + g_E(I_B, B) = \pm 2\cos\theta = 2|\cos\theta|$

同理， $\theta \in (0, \pi)$  时，

$$g_{Sum}(I_B, B_{\pi/2}) = 2\sin\theta = 2|\sin\theta|$$

$$g_{Sum}(I_B, B_{\pi/4}) = \pm 2(\cos\theta + \sin\theta) = 2|\cos\theta + \sin\theta|$$

$$g_{Sum}(I_B, B_{3\pi/4}) = \pm 2(\cos\theta - \sin\theta) = 2|\cos\theta - \sin\theta|$$

如果我们将  $g_{Sum}(I_B, B_0)$ ， $g_{Sum}(I_B, B_{\pi/2})$  作为一组梯度估计量， $g_{Sum}(I_B, B_{\pi/4})$ ， $g_{Sum}(I_B, B_{3\pi/4})$  作为另一组估计量，就可以分别对图像的边缘进行估计，如表 2 所示。

注：表 2 中右下角的  $\theta$  的估计实际是按照  $(\pi/4, 3\pi/4)$  的坐标系计算的，要换成统一的  $(0, \pi/2)$  坐标系，则有  $\theta^T = \theta' - \pi/4 = (\pi/4 + \theta) - \pi/4 = \theta$

由表 2 可以看出：这两组估计量的方向估计一致，幅值估计成  $\sqrt{2}$  倍关系。用任何一组估计量都可以得到一个具有方向性的形态学梯度算子，如果要将两组估计值结合起来，只要将  $M_{Sum}^{0,\pi/2}$  扩大  $\sqrt{2}$  倍，与  $M_{Sum}^{\pi/4, 3\pi/4}$  求最大值，可得：

$$M_{OEMG} = \text{Max}\{\sqrt{2} M_{Sum}^{0,\pi/2}, M_{Sum}^{\pi/4, 3\pi/4}\}$$

如此就把形态学梯度改造成具有方向估计的线性边缘检测滤波器。

边缘检测以后，图像用迭代求图像的最佳阈值的算法<sup>[6]</sup>转化成二值图像。具体步骤如下：

(1) 求出图像中的最大和最小灰度值  $Z_l$  和  $Z_k$ ，令阈值初值  $T^0 = (Z_l + Z_k)/2$ ；

(2) 根据阈值  $T^k$  将图像分割成目标和背景两个部分，求出两个部分的平均灰度值  $Z_O$  和  $Z_B$ ：

$$Z_O = \frac{\sum_{z(x,y) < T^k} z(x,y) \times N(x,y)}{\sum_{z(x,y) < T^k} N(x,y)}, Z_B = \frac{\sum_{z(x,y) > T^k} z(x,y) \times N(x,y)}{\sum_{z(x,y) > T^k} N(x,y)}$$

式中在  $z(x,y)$  是图像上  $(x,y)$  点的灰度值， $N(x,y)$  是  $(x,y)$  的权重系数，一般  $N(x,y)=1.0$ ；

(3) 求出新的阈值： $T^{K+1} = (Z_O + Z_B)/2$ ；

(4) 如果  $T^K = T^{K+1}$ ，则结束并得到阈值，否则  $K \leftarrow K+1$ ，转步骤 2；

(5) 根据阈值将原图像转化成为二值图像。大于阈值的像素值为 255；小于阈值的像素值为 0。

这样就完成了整个 OEMG 算法，它可将强噪声的灰度图像处理为只有目标的二值图像。

2.2 断点连接、孤点消除及轮廓的提取

OEMG 算法虽然能很好地实现目标与背景分离,但是图像中有时还会存在一些孤立的斑点,而且目标的外围轮廓线会有一些断点(如图7(b)),导致在该图像上得到的目标轮廓线不够平滑,对下一步的目标识别带来一定的影响。对此,本文在形态学理论的基础上,提出了一种类似于形态学的断点连接及孤点消除的算法。此算法快速有效,避免了繁琐的边界拟合运算,提高了实时性。

首先,建立 5×5 的方形结构元素如图 6 所示。

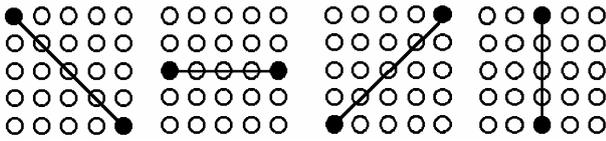


图 6 断点连接及孤点消除算法结构元素

算法简述:

(1) 新建一个与原图同样大小的内存空间,其所有元素赋初值为黑色(背景色);

(2) 用 5×5 结构元素遍历原图,在图 6 所示的 4 个方向上,查询各个方向上实心点所相应的两个元素是否都为白色(目标色)。如果是,就在新建图像的相应位置将该方向的 5 个元素都改为白色,否则,新建图像的相应位置色彩不变,即都是黑色。

经过该算法处理后的图像,图像中孤立的、其面积不大于 3×3 个像素的斑点可被消除;目标边缘的、间断距离不大于 3 个像素的断点已连接,使得目标的轮廓更加清晰、平滑。因为在 OEMG 算法中,模糊和形态学梯度所用的结构元素均为 3×3,所以在图像中,面积大于 3×3 像素的区域和间断距离不大于 3 个像素的断点均认为是感兴趣信息,予以保留。

有了光滑且连续的边缘,就可很容易地将轮廓提取出来。轮廓提取采取轮廓跟踪法<sup>[7]</sup>:

(1) 找到一个轮廓线上的点记为起始点(此点的某一方向上均为目标点,相反方向上均为背景点),在此点的基础上沿顺时针或逆时针方向找到下一个轮廓线上的点;

(2) 以此点为新的边界点,沿原方向继续寻找,直到回到起始点为止;

(3) 将所有边界点连起来,得到目标的轮廓线。

2.3 改进不变矩<sup>[8]</sup>

有了目标的轮廓线,就可利用改进不变矩,根据轮廓线的形状特点,识别出目标的类型。

令图像区域范围函数  $f(x,y)$  是分段连续的,其  $(m,n)$  阶矩定义为

$$M_{mn} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^m y^n f(x,y) dx dy \quad m, n=0,1,2, \dots$$

只要  $f(x,y)$  在  $x,y$  平面的有限部分中有非零值,则上式定义的所有各阶矩都存在。并且集合  $\{M_{mn}\}$  由  $f(x,y)$  唯一确定。反之,  $f(x,y)$  也可由  $\{M_{mn}\}$  唯一确定。由于  $\{M_{mn}\}$  与坐标的位置有关,不具备平移转换的不变性,所以不宜作为特征使用。 $(m+n)$  阶的中心矩具有平移转换的不变性,因此是良好的候选特征,定义为

$$\mu_{mn} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x-x_0)^m (y-y_0)^n f(x,y) dx dy$$

式中  $x_0 = M_{10}/M_{00}, y_0 = M_{01}/M_{00}$ 。离散形式为

$$M_{mn} = \sum_x \sum_y x^m y^n f(x,y)$$

$$\mu_{mn} = \sum_x \sum_y (x-x_0)^m (y-y_0)^n f(x,y)$$

$$\begin{cases} \mu_{00} = M_{00} \\ \mu_{01} = \mu_{10} = 0 \\ \mu_{11} = M_{11} - x_0 M_{01} = M_{11} - y_0 M_{10} \\ \mu_{20} = M_{20} - x_0^2 M_{00} \\ \mu_{02} = M_{02} - y_0^2 M_{00} \\ \mu_{12} = M_{12} - x_0 M_{02} - 2y_0 M_{11} + 2y_0^2 M_{10} \\ \mu_{21} = M_{21} - y_0 M_{20} - 2x_0 M_{11} + 2x_0^2 M_{01} \\ \mu_{30} = M_{30} - 3x_0 M_{20} + 2x_0^3 M_{00} \\ \mu_{03} = M_{03} - 3y_0 M_{02} + 2y_0^3 M_{00} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 = I_{20} + I_{02} \\ C_2 = (I_{20} - I_{02})^2 + 4I_{11}^2 \\ C_3 = (I_{30} - 3I_{12})^2 + (3I_{21} - I_{03})^2 \\ C_4 = (I_{30} + I_{12})^2 + (I_{21} + I_{03})^2 \\ C_5 = (I_{30} - 3I_{12})(I_{30} + I_{12})[(I_{30} + I_{12})^2 - 3(I_{21} + I_{03})^2] \\ \quad + (3I_{21} - I_{03})(I_{21} + I_{03})[3(I_{30} + I_{12})^2 - (I_{21} + I_{03})^2] \\ C_6 = (I_{20} - I_{02})[(I_{30} + I_{12})^2 - (I_{21} + I_{03})^2] \\ \quad + 4I_{11}(I_{30} + I_{12})(I_{21} + I_{03}), \\ C_7 = (3I_{21} - I_{03})(I_{30} + I_{12})[(I_{30} + I_{12})^2 - 3(I_{21} + I_{03})^2] \\ \quad + (I_{30} - 3I_{12})(I_{21} + I_{03})[3(I_{30} + I_{12})^2 - (I_{21} + I_{03})^2] \end{cases}$$

$$I_{mn} = \mu_{mn} / M_{00}^r, \quad r=(m+n)/2+1, \quad m+n=2, 3 \dots$$

$C_1, \dots, C_7$  这 7 个矩特征构成的矩组对于平移、比例和旋转都是不变的量。此外,某些低阶矩具有明显的物理意义:  $M_{00}$  是目标的面积,  $x_0, y_0$  便是目标中心坐标。目标的偏心率:  $\theta = (\mu_{02} - \mu_{20})^2 + 4\mu_{11} / M_{00}$ , 目标的伸展量:  $S = \mu_{02} + \mu_{20}$ 。

为了克服实时图与基准图之间因旋转与比例变化给匹配带来的影响, Wong<sup>[9]</sup>尝试用矩不变量, 作为图像特征进行匹配, 但效果不理想。他试验显示, 有将近 20% 的图像匹配位置出现了多值现象。我国学者丁明跃认为不变矩的平移不变性是造成匹配概率下降的原因, 它使匹配结果出现了多值, 无法最后确定最好的匹配点。因此, 对于图像匹配而言, 只需要具有旋转和比例的不变性的图像特征就好了。另外, 笔者还认为, 导致匹配位置出现多值除了上述的原因以外, 还与实时图与基准图之间的灰度差异有关。因此, 本系统本算法都是基于二值图像的基础之上的, 并对目标提取单像素宽度的边缘, 很好地避免了灰度差异造成的干扰。

据上述的矩不变量的物理特性, 如果我们用原点矩代替中心矩<sup>[10]</sup>, 就能很方便地去掉矩不变量的平移性, 而且减少了部分计算量, 提高了匹配速度。具体方法如下: 令  $I_{mn} = M_{mn} / M_{00}^r$ , 代入  $C_1, \dots, C_7$  即可, 其它的所有步骤均不变, 这样就很好地达到了去掉矩不变量中的平移性。在物理上这种做法也很好解释, 用原点矩代替中心矩, 默认所计算区域的中心为原点, 减少目标平移带来的干扰。在算法实现上需要在目标轮廓提取时顺便将目标区域坐标保留, 在进行原点不变矩计算时用。

### 3 实验分析及结论

#### 3.1 算法的实现

实验采用了我国自行研制的两种无人机试飞录像带进行。图 7(a)为截取的一张图片, 图中左下角为 A 型无人机, 右上角为 B 型; 图 7(b)为经过 OEMG 运算后的结果图, 我们可以看到: 虽然目标与强随机噪声较好地分离, 但仍有少量斑点存在, 且目标边缘有断点存在; 图 7(c)为经过本文介绍的断点连接孤点消除运算后的结果图, 我们可以看到: 图中目标的轮廓清晰平滑且基本上没有噪声斑点; 图 7(d)为经过轮廓提取后的结果图。

图 7 中的 A、B 两型飞机所算出的不变矩参数为图 8 所示。从图 8 中可以很明显的看出两个飞机目标不变矩参数的差异。这个差异就是目标识别的基础, 用算得的目标的不变矩与库存的各种飞机型号的矩描述子一一进行比较, 如果误差最小且在一定的范围之内, 就可判定目标为此种型号的飞机。

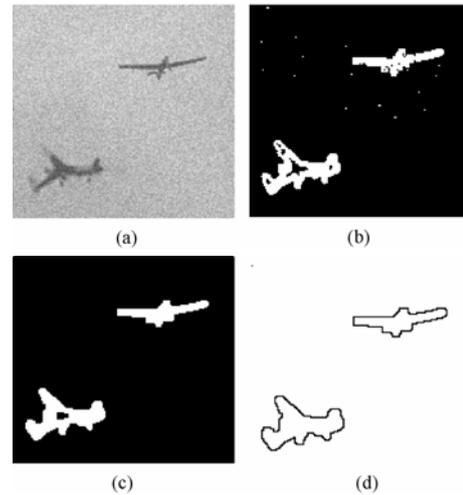


图 7 目标轮廓提取算法过程

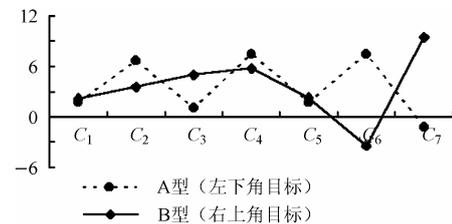


图 8 两目标不变矩参数比较

#### 3.2 工程实践

文中算法在 WINDOWS 2000 平台下用 VC++ 6.0 实现。图像采集卡选用加拿大 Matrox 公司的 Meteor-II 专业图像采集卡(含硬件处理芯片)。PC 机的 CPU 主频为 1.8GHz, 内存为 512M 时, 接收的图像为  $640 \times 480$  的灰度图像, 并通过 PC 机的串口实时自动控制 CCD 摄像头的焦距。PC 机中存储 A、B 两种型号无人机各种飞行姿态的轮廓样本各 24 个。A、B 两型无人机均有在晴朗、多云和阴雨 3 种天气飞行的录像片段。在每个片段中, 分别采用 4 种方法进行目标识别:

- (1) Sobel 算子边缘检测+改进的不变矩;
- (2) sobel 算子边缘检测+断点连接、孤点消除(本文算法)+改进的不变矩;
- (3) OEMG(本文算法)+改进的不变矩;
- (4) 完整使用本文算法。

从实验结果(如下表 3 所示)可以看出: 单单使用本文提出的某一环节的算法, 识别率也会有所提高(第 2、3 种算法); 完全使用本文算法, 每秒中可实时处理 4 幅图像。在各种天气条件下, 识别率均在 90% 以上, 且误判率可控制在 0.1% 以下。如果可以增加库存的飞机姿态样本的数量, 或者提高 CCD 摄像的清晰度, 目标的识别率还会进一步提高。

表 3 各种算法目标识别比较

## A 型无人机

	晴朗天气识别率(%)	多云天气识别率(%)	阴雨天气识别率(%)	单幅图像片均耗时(s)
第 1 种	62.7	60.1	50.3	0.093
第 2 种	68.9	65.8	52.1	0.118
第 3 种	90.2	88.3	87.2	0.156
本文算法	95.9	92.7	90.8	0.237

## B 型无人机

	晴朗天气识别率(%)	多云天气识别率(%)	阴雨天气识别率(%)	单幅图像片均耗时(s)
第 1 种	72.3	68.4	65.8	0.093
第 2 种	75.2	75.1	69.3	0.118
第 3 种	93.5	90.8	90.2	0.156
本文算法	97.3	95.2	95.4	0.237

## 参 考 文 献

- [1] Dougherty E R, Astola J. An introduction to nonlinear image processing. SPIE, 1994, Tutorial Text Vol. TT16: 2 – 5
- [2] Lee J, Haralick R M, Dhapiro L G. Morphological edge detector. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1987, RA-3(2): 142 – 153.
- [3] Mahdavih Y, Gonzalez R C. Advance in Image Analysis, SPIE Optical Engineering Press, 1992: 432 – 437.
- [4] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image Processing Analysis and Machine Vision(2ed), PWS Kent, 1998: 4.3.2 – 4.3.3
- [5] Paplinski A P. Directional filtering in edge detection. *IEEE Tran.. on Image Processing*, 1998: 7(4): 611 – 615.
- [6] 杨枝灵, 王开. Visual C++数字图像获取、处理及实践应用.北京: 人民邮电出版社, 2003: 535 – 537.
- [7] 何斌, 马天宇, 王运坚, 朱红莲. Visual C++ 数字图像处理. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 435 – 437.
- [8] Sonka M, Hlavac V, Boyle R, 艾海舟, 武勃. Image Processing Analysis and Machine Vision(2ed),北京: 人民邮电出版社, 2003: 177 – 178.
- [9] Wong Y R. Scene matching with invariant moments CGIP, 1978, 8: 16 – 24
- [10] 周振环. 图像特征提取及应用研究. [博士论文], 西安: 西北工业大学, 2001: 62 – 63.
- 姜 涌: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为数字图像处理与模式识别、计算机视觉.
- 曹 杰: 男, 1963 年生, 研究员, 研究方向为遥控遥测、数字图像处理.
- 杜亚玲: 女, 1979 年生, 博士生, 研究方向为 GPS、GIS.
- 李 勃: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为数字信号处理.