

一种鲁棒型 Hausdorff 距离图像匹配方法

孙瑾¹⁾ 顾宏斌²⁾ 秦小麟¹⁾ 周娜²⁾

¹⁾(南京航空航天大学信息科学与技术学院,南京 210016) ²⁾(南京航空航天大学民航学院,南京 210016)

摘要 图像匹配是图像处理的一项关键技术,传统方法受光照、噪声和遮挡的影响,使匹配过程变得困难。为了提高图像匹配的鲁棒性,提出了一种基于方向信息的鲁棒型 Hausdorff 距离匹配方法。该方法采用方向信息提取图像边缘,通过计算边缘匹配率(edge matching rate, EMR)获得候选匹配区域,然后采用修正后的 Hausdorff 距离构造相似性测度。实验结果表明,该方法加快了匹配过程,提高了抗噪性能,并能够准确匹配含有遮挡和伪边缘点的图像,从而解决了基于传统 Hausdorff 距离匹配方法因噪声点、伪边缘点和出格点而造成的误匹配问题。

关键词 图像匹配 Hausdorff 距离 边缘检测

中图法分类号:TP391.4 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)04-0761-07

An Image Matching Algorithm Using Robust Hausdorff Distance

SUN Jin¹⁾, GU Hong-bin²⁾, QIN Xiao-lin¹⁾, ZHOU Na²⁾

¹⁾(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

²⁾(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Image matching is very important in image processing. The conventional matching methods are easily affected by occlusions, light and noises, which make the matching more complicated. In order to improve the robust performance of image matching, this paper proposes an orientation-based robust Hausdorff distance for image matching. An edge detector based on the direction information is performed to get edge image. To achieve the promptness of image matching, EMR (edge matching rate) is introduced to determine which position can be the possible matching location, and further to construct a similarity measure based on the improved Hausdorff distance to find the correct location. The experimental results show that the proposed algorithm speeds up the matching process and it improves the resistance to noise. In addition, this method matches the image occlusions correctly and overcomes the mismatching problems that induced by noise, spurious edge segments and outlier points, which demonstrate that the proposed method is feasible and effective.

Keywords image matching, Hausdorff distance, edge detection

1 引言

图像匹配是计算机视觉及图像处理等领域中的关键步骤,广泛运用于目标识别、跟踪和医学图像处理等领域。图像匹配主要有基于特征和基于灰度相关两种方法。基于灰度相关匹配方法容易受光照、遮挡等因素影响,而传统的基于特征匹配方法需要

建立模板与图像间的对应关系,计算复杂度高。基于 Hausdorff 距离的图像匹配方法^[1]不需要建立特征点间的对应关系,计算简便。现有的改进 Hausdorff 距离方法^[1-3]进一步克服了图像中因为出格点、遮挡所造成的误匹配,但是对于伪边缘点、噪声问题并不能有效地解决^[4],同时计算复杂,难以满足实时性要求。为此提出了一种基于方向信息的鲁棒型 Hausdorff 距离匹配方法(oriented-based

基金项目:民航总局科技基金项目(E9905-MH)

收稿日期:2006-08-22;改回日期:2006-11-16

第一作者简介:孙瑾(1978~),女。现为南京航空航天大学博士研究生。主要研究方向为图像分析与处理、基于图像的绘制等。

E-mail:sunjinly@nuaa.edu.cn

robust Hausdorff distance, ORHD)。该方法采用方向信息提取边缘特征点,通过计算 EMR (edge matching rate) 获得候选匹配区域,提高匹配速度,然后基于修正后的 Hausdorff 距离构造相似性测度。实验结果表明,该方法不仅加快了匹配过程,而且提高了抗噪性能,能够准确定位,较好解决了基于传统 Hausdorff 距离的图像匹配因噪声点、伪边缘点和出格点而造成的误匹配问题,提高了匹配过程的可靠性和稳定性。

2 传统 Hausdorff 距离及其改进形式

给定两个有限点集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$, 则 A, B 间的 Hausdorff 距离 $H(A, B)$ 定义为^[1]

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (1)$$

式中, $h(A, B)$, $h(B, A)$ 分别是 $A \rightarrow B, B \rightarrow A$ 的有向 Hausdorff 距离, 定义为

$$h(A, B) = \max_{a \in A} d(a, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} d(a, b) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (2)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} d(b, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} d(b, a) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (3)$$

符号 $\|\cdot\|$ 表示点集 A, B 上的某种距离范数。

传统 Hausdorff 距离在计算上容易实现,但对噪声和遮挡十分敏感。一些经典 Hausdorff 距离改进形式的提出有效地处理了当图像目标发生遮挡和有出格点存在的情形。

Huttenlocher 提出了部分 Hausdorff 距离 (partial Hausdorff distance, PHD)^[1], 其有向距离定义为

$$h_k(A, B) = K_{a \in A} d(a, B) \quad (4)$$

式中, $K_{a \in A}$ 为 $d(a, B)$ 从小到大排序后的第 K 个值。

Dubuisson 和 Jain 提出改进 Hausdorff 距离 (modified Hausdorff distance, MHD)^[2], 其中,

$$h_{\text{MHD}}(A, B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} d(a, B) \quad (5)$$

式中, N_A 为点集 A 中元素的个数。

Sim 等人提出两种不同的 HD 修改形式^[3], 第一种称为 M-estimation Hausdorff 距离 (M-HD), 其有向距离表示为

$$h_{\text{M-HD}} = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} \rho(d(a, B)) \quad (6)$$

代价函数 ρ 是对称函数, 定义为

$$\rho(x) = \begin{cases} |x| & |x| \leq \tau \\ \tau & |x| > \tau \end{cases}$$

其中, τ 是用来剔除出格点的阈值。第二种修改形式称为 LTS Hausdorff 距离 (LTS-HD), 其有向距离为

$$h_{\text{LTS}}(A, B) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^H d(a, B)_i \quad (7)$$

式中, H 同部分 Hausdorff 距离中的参数 K 意义相似, $H = h \times N_A$, $0 < h < 1$ 。 $d(a, B)_i$ 表示对序列 $d(a, B)$ 排序后的第 i 个距离值。

3 鲁棒型 Hausdorff 距离的提出

改进 HD 在一定程度上克服了传统 HD 的不足, 但是还分别存在不同的缺陷, 影响了实际应用^[3], 特别是伪边缘点^[4]。如图 1 所示, 无论是传统 HD 还是改进 HD, 由于垂直线段底部端点 (图 1(b)) 和三角形的底边 (图 1(c)) 产生的伪边缘, 图 1(a) 中图像在图 1(b) 和 (c) 中都可能找到匹配位置, 与实际相悖。一种解决方法是采用边缘跟踪认为小于某个阈值 (通常为 3) 的边缘点所组成的边缘是伪边缘^[4]。该方法对图 1(b) 中情况有效, 但是效率低, 同时对图 1(c) 中出现的情况无法解决。

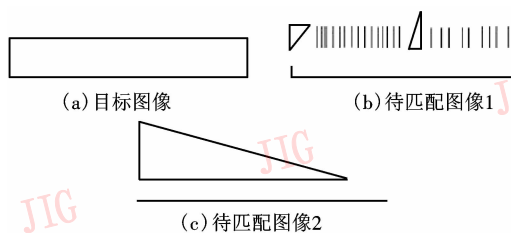


图 1 合成图像的匹配

Fig. 1 Matching of a synthetic image

方向性是边缘的本质特征, 图像边缘的切线方向指出了当前边缘点和相邻边缘点的相对位置关系, 而切线的垂直方向则指出了图像灰阶梯度的方向。以图像灰阶梯度方向定义边缘方向。图 1(b) 和 (c) 中的伪边缘虽然与目标图像中相应点的 Hausdorff 距离很小, 但是根据边缘的走向, 利用八方向链码, 边缘梯度方向不一致, 图 1(a)、(b) 相差 90° , 图 1(a)、(c) 相差 180° 。近年来也出现了结合边缘方向的图像匹配方法, 如文献^[5]采用梯度信息, 但是对光照敏感; 文献^[6]以方向作为权重, 没有考虑到距离为零, 而方向相差很大的情

况,无法解决图 1(b)、(c)中出现的问题。文献[7]方法将方向离散化,当方向相差很大的情况,实验结果表明会出现误匹配^[2],算法不完备。针对上述 3 种方法的不足,提出基于方向信息的鲁棒型 Hausdorff 距离,综合考虑出格点、遮挡和伪边缘等因素。

3.1 基于方向信息的抗干扰性边缘提取

Hausdorff 距离需要先提取图像的特征点集,特征点的选择将直接影响匹配结果。文献[8]为提高运算速度提取关键点进行匹配,当出现遮挡时会出现误匹配^[9]。边缘代表了图像的本质结构,匹配的关键信息往往在边缘处,所以图像边缘是特征空间的一个很好选择。现有的边缘检测方法存在各种不足,例如 Sobel 和 Prewitt 算子等只有两个方向的模板(如图 2),只对水平和垂直方向边缘有较强的响应,缺乏抗噪能力。Canny 算子计算复杂,而且需要针对不同的图像选择不同的参数。本文充分考虑边缘方向特性,提出了一种基于方向信息的边缘提取算法(oriented-based edge detection, OED)。该方法可以提取较为清晰的图像边缘,并在一定程度上克服图像噪声。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

图 2 Sobel 算子

Fig. 2 Soble detector

梯度方向是函数增长最快的方向,边缘处图像的灰度值发生了突变,则在图像边缘处的梯度方向与该点灰度差值最大的方向一致,即与图像在该边缘处的切线方向垂直。选用一个 3×3 的模板

$$\begin{bmatrix} (x-1, y+1) & (x, y+1) & (x+1, y+1) \\ (x-1, y) & (x, y) & (x+1, y) \\ (x-1, y-1) & (x, y-1) & (x+1, y-1) \end{bmatrix}$$

根据模板 8 个方向位置的对应灰度差值可以粗略地确定边缘梯度方向,同时基于以上假设,可以定义点 (x, y) 新的灰度值为

$$G(x, y) = a[|f(x-1, y) - f(x+1, y)|] + b[|f(x-1, y-1) - f(x+1, y+1)|] + b[|f(x+1, y-1) - f(x-1, y+1)|] \quad (8)$$

式中,假设水平方向灰度差值最大。 $f(x, y)$ 是点

(x, y) 的灰度值。参数 a, b 为加权值,在一阶微分算子中 Sobel 算子处理效果较好,参考 Sobel 算子权重选择, a 设为 2, b 设为 1。权重的选择使该算法对边缘走向敏感。同时根据式 $f(x-1, y) - f(x+1, y)$ 的符号可以确定边缘在该像素点处的梯度方向。

上述算法对噪声敏感,只能得到一些候选边缘点。根据图像边缘的连续性,如果一个点是边缘点,则它和其相邻点都是边缘点。图像边缘的切线方向指出了边缘点与相邻边缘点的相对位置关系,切线的垂直方向是图像灰阶梯度方向,通过以上算法获得的梯度方向可以作为寻找和检测真正边缘点的重要依据。一般情况下,沿任一噪声点的方向不太可能找到与其灰度值和方向都相差很小的边缘点。所以根据边缘的以上特性提出以下约束条件:

(1) 相邻边缘点的灰度值应该相差很小;

(2) 相邻边缘点的方向夹角应该小于一定的阈值,即它们的灰阶梯度方向也应该小于该阈值。实验中采用 8 邻域链码,根据边缘的平滑特性,该阈值可以设为 90° 。

当两个相邻点的方向夹角大于阈值时,需要具体判断哪个是噪声点。一般两个相邻点同时为噪声点的几率很小,即使同为噪声点,由于噪声点的无规律性,它们之间的夹角也很难满足要求。所以考察每个候选边缘点,若有两个以上相邻点与其的方向夹角大于阈值,就可认为是噪声点。反之若中心点 M 只与相邻点 N 的方向夹角大于阈值,那么认为该中心点 M 为边缘点,继续考察 N 与其相邻边缘点的关系进行判断。

图 3 分别显示了几种不同边缘提取算法的结果,其中,图 3(c) 序列是对原始 Lena 图提取的边缘(Canny 算子中 σ 是高斯滤波的标准方差)。可以看出 OED 算法提取的边缘比传统方法(Sobel 和 Prewitt 算子)清晰、细致。Canny 算子提取的边缘效果较好,但是具体实现包括 5 个部分^[10],算法复杂,需要多次遍历图像,而且要求预先设定阈值 σ ,阈值的不同将直接影响结果。OED 算法只需遍历图像一次,无需进行阈值选择。图 3(d) 序列显示了对卷积加噪后 Lena 图进行边缘提取的结果, OED 算法提取的边缘相对传统算子较好,具有一定的抗干扰能力,并且 OED 算法提供的方向信息为后继的匹配提供了重要依据。

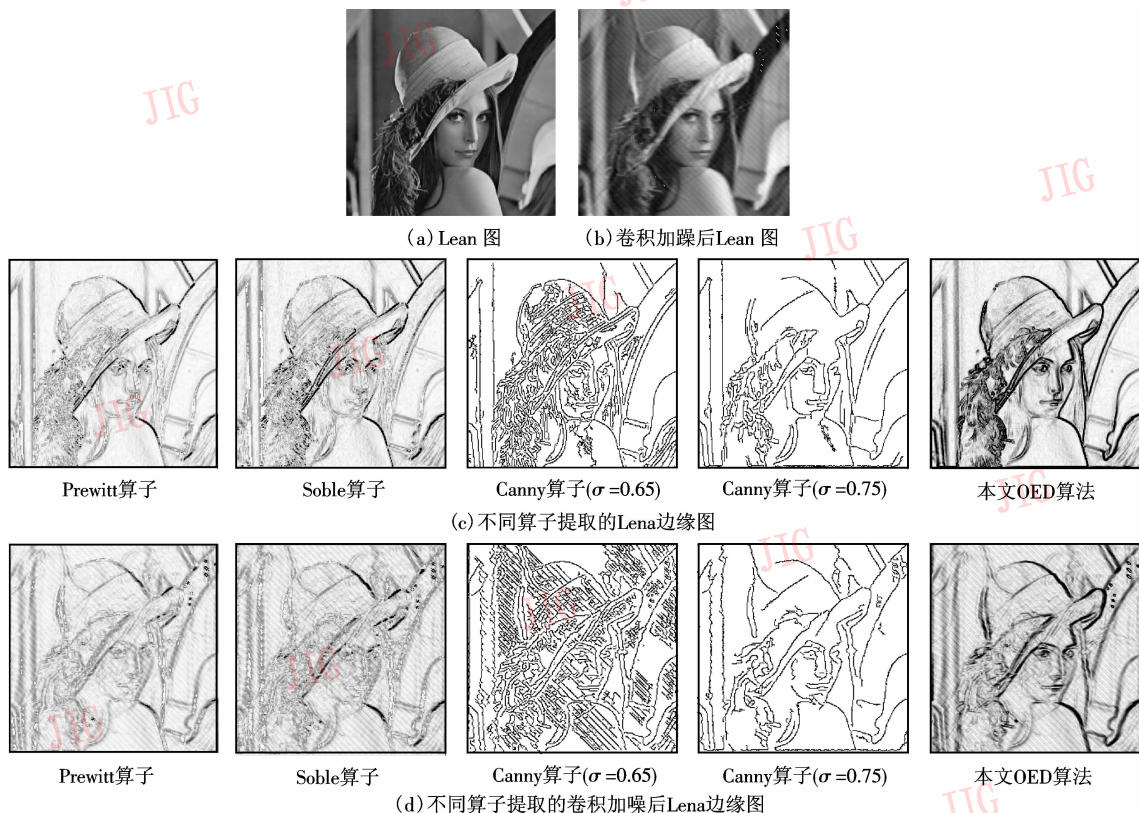


图 3 不同算子提取的边缘图比较

Fig. 3 Comparison of the edge detection by different edge detectors

3.2 匹配预处理

传统 HD 和改进 HD 需要在每一个待匹配子图区域分别进行距离计算,在边缘点个数很大的情况下,计算量大。由于待匹配图像中大部分区域是非重要区域,为了提高效率,ORHD 首先通过边缘匹配率 EMR 进行粗匹配,剔除与模板有明显区别的区域。

$$EMR = \frac{Num(E_c(i,j))}{\text{Max}(Num(E_T(i,j)), Num(E_I(i,j)))} \quad (9)$$

式中, $E_T(i,j)$, $E_I(i,j)$ 分别代表模板边缘图像和待匹配图像的边缘图像。如果模板边缘图像中点 (i,j) 是边缘点, $E_T(i,j) = 1$, 否则 $E_T(i,j) = 0$ 。同理,若待匹配边缘图像中点 (i,j) 是边缘点, 则 $E_I(i,j) = 1$ 。 $E_c(i,j) = (E_T(i,j) \text{ and } E_I(i,j))$, 表示模板边缘点在待匹配图像中有对应边缘点, 则 $E_c(i,j) = 1$ 。 Num 是计算相关边缘图像中边缘点的个数, 即 $E_p(i,j)$ ($p = T, I, C$) 的值为 1 的像素点个数。 EMR 反映了待匹配图像与模板图像间的匹配程度, 根据人眼视觉经验, 选择 $EMR \geq 0.5$ 的区域作为候选匹配区域。

3.3 构造相似性测度

假定 A 为模板图像, B 为待匹配图像, ORHD 有

向距离 $h_{ORHD}(A, B)$ 定义为

$$h_{ORHD} = |A| / (EMR \cdot |A'|) \cdot \frac{1}{|A'|} \sum_{a \in A} d(a, B) \quad (10)$$

$|A|$ 表示点集 A 中元素个数, $|A'|$ 表示在点集 B 中有对应点的点集 A 的元素个数。 $|A| \geq |A'|$, 当且仅当两幅图像完全匹配时等号成立。以含有随机噪声 Lena 图为例, 部分 Hausdorff 距离如图 4 所示, 第 1 个转折点处对应 k 值就等于 $|A'|$ 。文献 [11] 利用曲线二阶导数在 k 值处具有极大值求解 $|A'|$, 计算

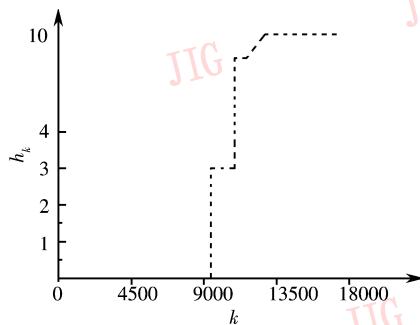


图 4 部分 Hausdorff 距离分析

Fig. 4 Analysis of Partial Hausdorff distance

复杂,计算量大。当匹配的误差超过一定的像素,这种匹配就没有意义,所以只需在一个邻域内进行距离计算^[12]。选取 3×3 邻域(图 5), $R_2 = \sqrt{2}$, $R_5 = \sqrt{5}$, Inf 代表无限远,则点集 $A' = \{a \mid a \in A, d(a, B) \leq R_5\}$ 。式(10)中 $|A| / (EMR \cdot |A'|)$ 主要考虑遮挡和出格点因素。实验结果证明^[2,13], Hausdorff 有向距离采用平均值效果较好,所以式(10)中为 A' 中 $d(a, B)$ 的平均值。

	Inf	R_5	2	R_5	Inf
R_5	R_2	1	R_2	R_5	
2	1	P	1	2	
R_5	R_2	1	R_2	R_5	
Inf	R_5	2	R_5	Inf	

图 5 3×3 邻域中距离计算

Fig. 5 The distance calculation in neighborhood of 3×3

$d(a, B)$ 可以通过棋盘距离 (chessboard distance)、街区距离 (city-block distance) 和 (Euclidean distance) 计算得到,实验结果证明^[2] 欧氏距离效果最好,所以 ORHD 结合方向信息,式(10)中 $d(a, B)$ 计算方法如下:

$$d(a, B) = \min_{b \in B_i} ((I^2 \text{Differntdirection}(a, b))^2 + (1 - I)^2 \|a - b\|^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中, $\text{Differntofirection}(a, b)$ 表示模板和待匹配图像对应点间方向差(采用八邻域链码)。 I 是权重,取值如下:

$$I = \begin{cases} 0.2 & \text{Differntdirection} < 2 \\ 0.8 & \text{Differntdirection} \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

避免了出现单一计算方向或距离的情况所造成的误匹配。

4 实验结果

4.1 含有伪边缘图像匹配实验

对图 1 和文献[3]中图像进行匹配实验,采用 MHD 和 M-HD 均存在匹配区域,如图 6 和图 7 中虚线所示。采用 ORHD 没有找到匹配位置,与实际相符,说明 ORHD 方法可以有效解决伪边缘问题。

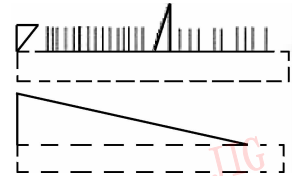


图 6 MHD 和 M-HD 对图 1 中图像的匹配结果

Fig. 6 Matching results of the image as in

Fig. 1 by MHD and M-HD

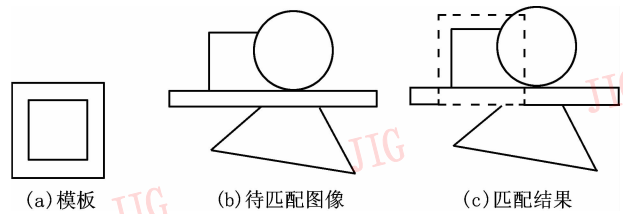


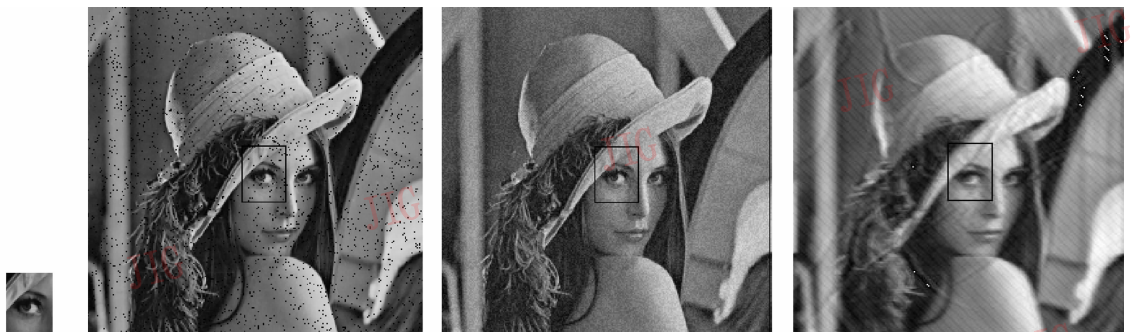
图 7 MHD 和 M-HD 对含有伪边缘图像匹配结果

Fig. 7 Matching results of the image including

spurious edge by MHD and M-HD

4.2 含有噪声图像匹配实验

图 8 显示了采用 ORHD 对含有噪声 Lena 图的匹配结果;图 9 是用不同算子对一幅实际拍摄图像提取的边缘图比较;图 10 显示了对实际图像在不同噪声下进行匹配的结果。



(a) 模板图像 (b) 含有椒盐噪声的Lena图像

(c) 含有随机噪声的Lena图像

(d) 卷积加噪模糊后Lena图像

图 8 Lena 图像匹配结果

Fig. 8 Matching result of Lena

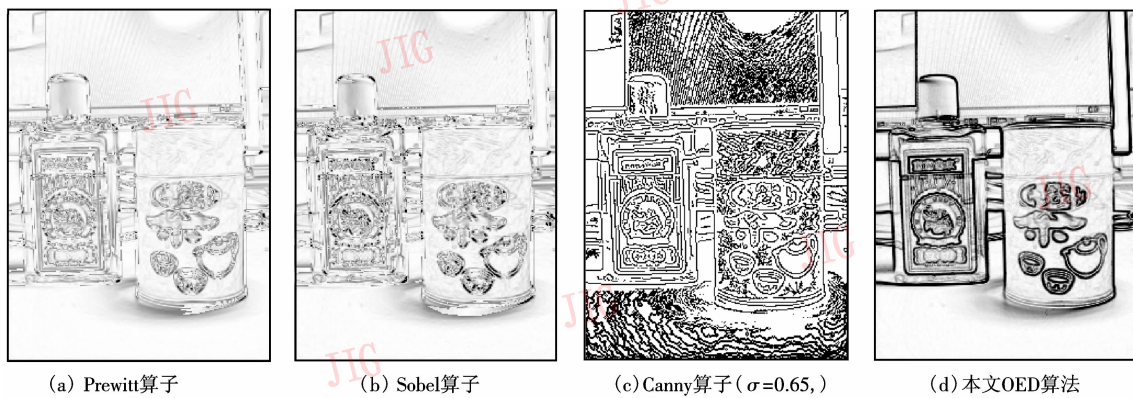


图 9 不同算子提取的实际图像的边缘图比较

Fig. 9 Comparison of the edge detection of real image by different edge detectors

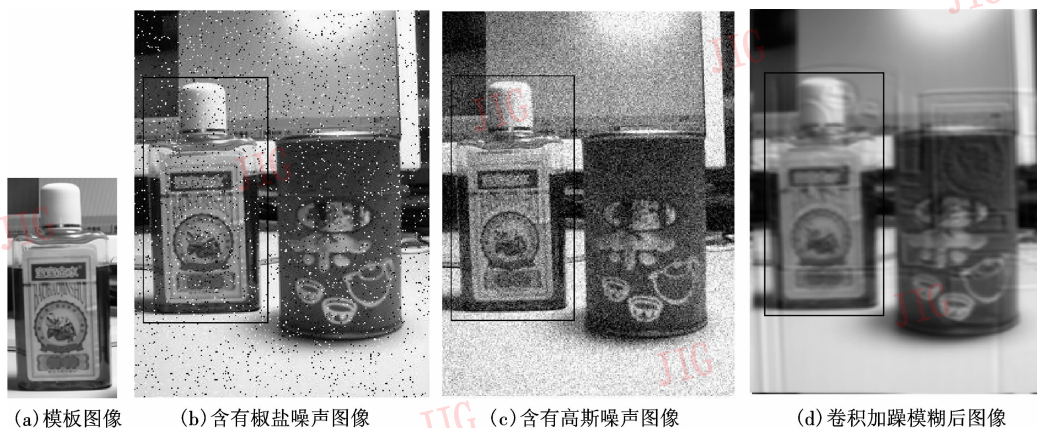


图 10 实际图像匹配结果

Fig. 10 Matching result of real image

4.3 含有遮挡图像匹配实验

图 11 和图 12 是在存在遮挡情况下验证 ORHD 的鲁棒性。



图 11 遮挡 Lena 图匹配结果

Fig. 11 Matching result of occlusion Lena



图 12 实际遮挡图像匹配结果

Fig. 12 Matching result of real occlusion case

4.4 对比实验

分别采用 CHD, MHD 及 M-HD 和本文 ORHD

方法针对噪声、遮挡等情况进行对比实验,其中实际图像采用图 10,遮挡图像为图 12,比较匹配位置和匹配时间,实验结果如表 1 所示。

表1 ORHD 与传统及改进 HD 算法比较

Tab.1 Comparison result of the ORHD, CHD and the improved HD

	原始图匹配位置		高斯噪声图匹配位置		遮挡图像	匹配时间(s)	
	Lena 图 (117,106)	实际图像 (8,67)	Lena 图 (117,106)	实际图像 (8,67)	匹配位置 (22,62)	Lena 图	实际图像
CHD	(117,106)	(8,67)	(62,18)	(37,10)	无匹配位置	91	536
MHD	(117,106)	(8,67)	(117,106)	(7,69)	(23,62)	89	496
M-HD ($t=5$)	(117,106)	(8,67)	(117,106)	(7,69)	(23,62)	89	499
ORHD	(117,106)	(8,67)	(117,106)	(7,68)	(22,62)	16	39

5 结 论

分析了传统 HD 及其经典改进形式所存在的缺陷,在此基础上提出了 ORHD 图像匹配方法。ORHD 综合考虑了伪边缘点,噪声和遮挡等因素,实验结果表明,ORHD 图像匹配方法具有以下优点:

(1) 通过引入方向信息提取边缘特征点,方法简单易行,不仅提高了抗噪能力,而且还提供方向信息,为后继的图像匹配提供了重要的依据。

(2) 将方向信息与 Hausdorff 距离相结合,通过修正后的 Hausdorff 距离构造相似性测度,较好解决了传统 Hausdorff 距离及其改进 Hausdorff 距离因噪声点、出格点造成的误匹配问题,特别是解决了传统和改进 Hausdorff 距离无法克服的伪边缘点问题。对合成图像和实际图像的匹配实验结果证明,该方法具有较好的鲁棒性。

(3) 通过计算匹配率 EMR 进行匹配预处理,大大加快了匹配过程。

参考文献 (References)

- 1 Huttenlocher D P, Klanderman G, Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, **15**(9): 850 ~ 863.
- 2 Dubuisson M P, Jain A K. A modified Hausdorff distance for object matching [A]. In: Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition [C], Jerusalem, Israel, 1994: 566 ~ 568.
- 3 Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, **8**(3): 425 ~ 429.
- 4 Wang Yaming. Image matching based on robust Hausdorff Distance [J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics, 2002, **14**(3): 238 ~ 241. [汪亚明. 图像匹配的鲁棒性 Hausdorff 方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, **14**(3): 238 ~ 241.]
- 5 Yang C H, Lai S H, Chang L W. Reliable image matching via modified Hausdorff distance with normalized gradient consistency measure [A]. In: Proceedings of 3rd International Conference on Information Technology: Research and Education [C], Hsingchu, Taiwan, China, 2005: 158 ~ 161.
- 6 Sim Dong-Gyu, Park Rae-hong. Two-dimensional object alignment based on the robust oriented Hausdorff similarity measure [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(3): 475 ~ 483.
- 7 Olson Clark F, Huttenlocher D P. Automatic target recognition by matching oriented edge pixels [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, **6**(1): 103 ~ 113.
- 8 Held A, Abe K, Arcelli C. Towards a hierarchical contour description via dominant point detection [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 1994, **24**(6): 942 ~ 949.
- 9 Choi Wai-pak, Lam Kin-man, Siu Wan-chi. Robust Hausdorff distance for shape matching [A]. In: Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing' 2002 [C], San Jose, USA, 2002: 793 ~ 804.
- 10 Yang Zhi-ling, Wang Kai. The Acquisition, Processing and Practices of Digital Image by Visual C++ [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2003: 553 ~ 572. [杨枝灵, 王开. Visual C++ 数字图像获取、处理与实践应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 553 ~ 572.]
- 11 Zhang Jian-wei, Han Guo-qiang, Wo Yan. Image registration based on generalized and mean Hausdorff distance [A]. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics [C]. Guangzhou, China, 2005: 5117 ~ 5121.
- 12 Srisuk S, Kurutach W. A new Hausdorff distance-based face detection [A]. In: Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence in Science and Technology [C]. Hobart, Tasmania, Australia, 2000: 203 ~ 208.
- 13 Pujol Albert, Alba Jose Luis, Vilianueva Juan Jose. A supervised modification of the Hausdorff distance for visual shape classification [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 2002, **16**(3): 349 ~ 359.