

# 基于信息测度特征和 Hausdorff 距离的图像匹配策略

王慧燕 程翼宇

(浙江大学药物信息学研究所, 杭州 310027)

**摘要** 由于传统的图像匹配方法受到诸如景物的遮挡、光照和噪声的影响比较大,并且需要建立模板与图像间的对应关系,因而使实际图像的匹配变得困难。为了克服上述缺陷,以便快速地进行图像匹配,通过引入信息测度概念来提取边缘特征点,并基于修正后的 Hausdorff 距离构造相似性测度,提出了一种基于信息测度和 Hausdorff 距离的图像匹配策略。该策略不仅加快了匹配过程,提高了抗噪性能,而且能准确匹配遮挡图像,从而较好地解决了基于传统 Hausdorff 距离的图像匹配因噪声点、伪边缘和出格点而造成的误匹配问题。实验结果证明,该方法是正确有效的。

**关键词** 图像匹配 信息测度 Hausdorff 距离

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)11-1314-06

## An Image Matching Strategy Based on Information Measures and Hausdorff Distance

WANG Hui-yan, CHENG Yi-yu

(Pharmaceutical Informatics Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** The conventional matching methods are easily affected by scene occlusions, light and noise. On the other hand, the relationship of correspondence between model and image need to be built, which makes the matching process become more complicated. Then Hausdorff distance is used and the drawbacks of conventional partial Hausdorff distance is analyzed and corrected. To achieve image matching quickly, the concept of information measures is introduced into image matching to extract the edge characteristic points based on edge detection, and the similarity measures are constructed based on modified Hausdorff distance, then a new matching strategy is proposed based on information measures and Hausdorff distance. In this method, a process of pre-matching is used to pick out the unimportant regions by making use of some general information, such as the proportion of pixels' number in the range of preset gray level or preset information measure value, which speeds up the matching process greatly. The proposed strategy improves the resistance to noise and gives the criteria of parameter selection to some extent. In addition, this method matches the image occlusions correctly and overcomes the mismatching problems that induced by noise, spurious edge segments and outlier points. The experimental results demonstrate that the proposed strategy is feasible and effective.

**Keywords** image matching, information measure, Hausdorff distance

## 1 引言

图像匹配是图像处理的一项关键技术,在运动目标跟踪、识别、医学图像处理等领域已得到广泛应用。传统的匹配方法,如相关性匹配<sup>[1]</sup>等由于需要建

立模板与图像间的对应关系,因而使实际图像的匹配变得困难。基于 Hausdorff 距离的图像匹配虽可以解决上述问题<sup>[2]</sup>,然而,当图像中含有多特征点、伪特征点、噪声污染以及存在遮挡等情况时,传统的 Hausdorff 距离则容易造成误匹配<sup>[3]</sup>。现有的 Hausdorff 距离改进算法<sup>[4~6]</sup>虽然可以从一定程度

上克服上述缺点,但是计算复杂,难以满足实时性要求。本文通过引入信息测度概念,并结合 Hausdorff 距离,提出了一种新的图像匹配策略。实验证明,基于信息测度特征和 Hausdorff 距离的图像匹配策略大大加快了匹配过程,不仅能准确匹配噪声图像和遮挡图像,而且具有很高的可靠性和稳定性。

## 2 图像信息测度描述

信息测度是图像的重要特征之一,主要用于反映图像边缘的特点。为降低图像匹配的计算复杂度,采用如下信息测度提取重要区域特征:

以像素点  $(i, j)$  为中心的邻域为

$$\eta = \{(m, n) \mid |m - i| \leq L, |n - j| \leq L\} \quad (1)$$

其中,  $L$  为邻域半径。

(1) 邻域一致性测度<sup>[7]</sup>

如果过点  $(i, j)$  以方向  $\theta_k$  ( $0^\circ \leq \theta_k \leq 180^\circ, k = 1, 2, \dots, N$ ) 将邻域  $\eta$  分成两半  $S_k^{(1)}$  和  $S_k^{(2)}$ , 则邻域一致性测度  $R_{i,j}$  定义为

$$R_{i,j} = \max_k \{ |f_{S_k^{(1)}} - f_{S_k^{(2)}}| / [L(2L + 1)] \} \quad (2)$$

$k = 1, 2, \dots, N$

其中,  $f_{S_k^{(1)}} = \sum_{(m,n) \in S_k^{(1)}} x_{m,n}, f_{S_k^{(2)}} = \sum_{(m,n) \in S_k^{(2)}} x_{m,n}$  为像素点  $(m, n)$  的灰度值。  $R_{i,j}$  可有效反映边缘点邻域内的灰度分布差异:边缘区,  $R_{i,j}$  值较大,平滑区,  $R_{i,j}$  值较小。

(2) 方向性信息测度<sup>[8]</sup>

设过像素点  $(i, j)$  的方向  $\theta$  将邻域  $\eta$  分成  $S_\theta^{(1)}$  和  $S_\theta^{(2)}$  两半,方向性信息测度  $O_{i,j}$  定义为

$$O_{i,j} = d_{\theta_{\max}} - d_{\theta_{\min}} \quad (3)$$

其中,  $d_\theta = |f_{S_\theta^{(1)}} - f_{S_\theta^{(2)}}|, d_{\theta_{\max}} = \max_{0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ} (d_\theta), d_{\theta_{\min}} = \min_{0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ} (d_\theta), f_{S_\theta^{(1)}} = \sum_{(m,n) \in S_\theta^{(1)}} x_{m,n},$

$f_{S_\theta^{(2)}} = \sum_{(m,n) \in S_\theta^{(2)}} x_{m,n}$  为像素点  $(m, n)$  的灰度值。

$O_{i,j}$  在边缘区较大,在平滑区较小。

(3) 结构性信息测度<sup>[8]</sup>

像素点  $(i, j)$  邻域  $\eta$  内基于梯度分布的测度  $C_{i,j}$  定义为

$$C_{i,j} = \max_{0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ} \sum_{(m,n) \in l_\theta} g(m, n) / (2L + 1) \quad (4)$$

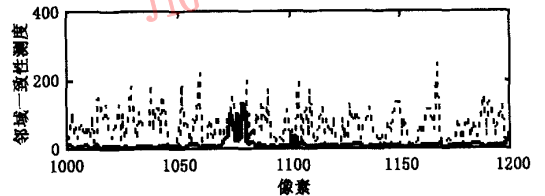
其中,  $g(m, n)$  表示点  $(m, n)$  处的梯度幅值,  $l_\theta$  是过中心点,且角度为  $\theta$  的一条直线。由于  $C_{i,j}$  具有平均作

用,因此可削弱噪声对边缘点的影响。

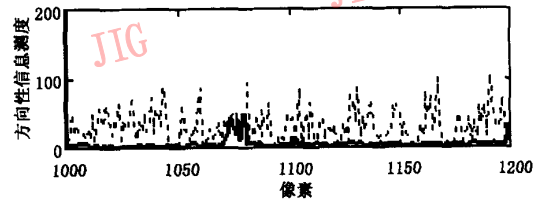
图 1 为一风景图,截取其 10~12 列像素后得到的边缘点和非边缘点的信息测度如图 2 所示。通过对比知,信息测度描述可如实反映边缘特征,其边缘部分信息测度值与非边缘部分有明显区别,即边缘点(点线所示)的测度值远大于非边缘点(实线所示)的测度值,尤其是结构性信息测度,其边缘部分与非边缘部分有很大反差。



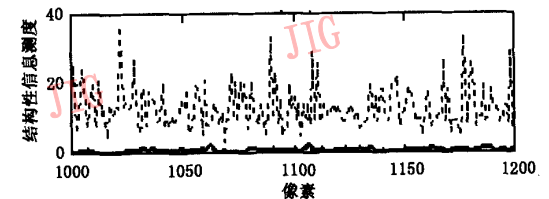
图 1 风景样图



(a) 图 1 10~12 列邻域一致性测度曲线



(b) 图 1 10~12 列方向性信息测度曲线



(c) 图 1 10~12 列结构性信息测度曲线

图 2 部分边缘点(点线)与非边缘点(实线)信息测度比较

## 3 基于 Hausdorff 距离和信息测度构造相似性测度

### 3.1 Hausdorff 距离

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

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (5)$$

其中,  $h(A, B)$ 、 $h(B, A)$  分别为  $A \rightarrow B$  与  $B \rightarrow A$  的有向 Hausdorff 距离, 定义为

$$h(A, B) = \max_{a \in A} [\min_{b \in B} (\|a - b\|)] \quad (6)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} [\min_{a \in A} (\|b - a\|)]$$

其中, 符号  $\|\cdot\|$  为定义在点集  $A$  和  $B$  上的某种距离范数。为方便起见, 定义  $d_B(a) = \min_{b \in B} \|a - b\|$ ,  $d_A(b) = \min_{a \in A} \|b - a\|$ , 则式(6)变为

$$H(A, B) = \max(\max_{a \in A} d_B(a), \max_{b \in B} d_A(b)) \quad (7)$$

其中,  $d_A(b)$  与  $d_B(a)$  可通过距离变换算法<sup>[7]</sup>获得。

为了有效处理当图像目标发生遮蔽和有外部点存在的情形, Huttenlocher 在 1993 年提出了部分 Hausdorff 距离的概念<sup>[3]</sup>。为削弱次要元素的影响, 引入了部分有向 Hausdorff 距离:  $h_K(B, A)$ 、 $h_T(A, B)$  分别为  $A \rightarrow B$  与  $B \rightarrow A$  的有向 Hausdorff 距离:

$$h_K(B, A) = K \max_{b \in B} d_A(b) \quad (8)$$

$$h_T(A, B) = T \max_{a \in A} d_B(a)$$

其中,  $p$ 、 $q$  分别为点集  $B$  与点集  $A$  的元素个数。将点集  $B$  中所有点按其点与点集  $A$  中相应最近点的距离大小进行排序,  $K_{b \in B}^k$  表示  $B$  中排序后的第  $K$  (即  $h_K$  的下角  $K$ ) 个点;  $T_{a \in A}^k$  的含义与  $K_{b \in B}^k$  类同,  $0 \leq K \leq p$ ,  $0 \leq T \leq q$ , 两者不一定相等。

### 3.2 Hausdorff 距离的改进

式(8)定义的部分 Hausdorff 距离还存在如下 3 个缺陷<sup>[9]</sup>:

- (1) 若待匹配图像  $I$  中存在伪边缘, 则可能造成误匹配。
- (2) 若待匹配图像  $I$  中含有较强的噪声或存在出格点时, 则可能造成误匹配。
- (3) 若待匹配图像  $I$  中所含的目标物体出现遮挡现象时, 则很难得到正确的匹配结果。

对于缺陷(1), 本文通过下列方法来克服, 即对得到的边缘图像, 根据信息测度本身具有的特征, 通过设定合适的信息测度范围, 即能消除大部分的噪声点和伪边缘点。由于剩下的是信息测度值与目标接近的个别噪声点和伪边缘点, 因此可根据具体情况设定阈值  $t$ , 并删掉边缘链中长度小于  $t$  的边缘点。实际上, 剩下的这部分噪声点和伪边缘点数量很少, 并且分散, 通常不会对匹配结果造成影响。

对于缺陷(2)和缺陷(3), 综合出格点、遮挡、噪声等因素, 可用一种改进的 Hausdorff 距离  $d_{Hausdorff}$  来克服, 其后向距离定义<sup>[6]</sup>为

$$h_M(I, M) = \frac{1}{N_I} \sum_{i \in I} \rho(d_M(i)) \quad (9)$$

其中,  $N_I$  是待匹配图像  $I$  中边缘点的个数, 代价函数  $\rho$  是凸的对称函数, 而且在零点有唯一的一个最小值, 定义为

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

其中,  $\tau$  是一个用来剔除出格点的阈值。只要能恰当地选择阈值  $\tau$ , 则出格点就能被很好地克服。

考虑到在实际应用中, 目标被遮挡的情况各不相同, 因此可对式(9)做进一步修正, 修正后的后向距离为

$$h_{mend}(I, M) = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^H \rho(d_M(i)) \quad (10)$$

其中, 参数  $U$  同式(8)中的参数  $K$  意义相似,  $U = \text{round}(v \times N_I)$ ,  $v \in [0, 1]$ , 其中参数  $v$  反映了待匹配图像中目标被遮挡的严重程度。通常结合信息测度的概念, 就可确定参数  $v$  的取值。

设模板  $M$  中特征点的数目为  $N_M$ , 邻域一致性信息测度范围为  $[R_{min}, R_{max}]$ 。待匹配图像中相应的子图像的信息测度在上述范围内的特征点的数目与  $N_M$  最接近的匹配子图  $\tilde{I}$ , 其特征点数目为  $\hat{N}_I$ 。

- (1) 若  $\hat{N}_I \geq N_M$ , 则认为子图像中不存在遮挡现象, 此时参数  $v$  的取值范围为  $v \in [1 - \delta, 1]$ 。
- (2) 若  $\hat{N}_I < N_M$ , 则可能存在以下两种情况之一:

- ① 子图像与模板图像不匹配;
- ② 子图像中的目标存在遮挡现象, 此时参数  $v$

的取值范围为  $v \in [\frac{\hat{N}_I}{N_M} - \delta, \frac{\hat{N}_I}{N_M}]$ , 其中  $\delta$  的取值与噪声有关。

### 3.3 构造相似性测度

由于匹配的关键信息往往在边缘处, 边缘部分信息测度值明显大于非边缘部分, 因此可采用下列步骤获得匹配特征点:

- (1) 根据模板  $M$  和待匹配图像中目标物体的特点, 选取合适的边缘检测方法, 首先提取出目标物的边缘;

- (2) 计算提取到的边缘点的信息测度, 即确定一个信息测度范围, 若该范围包含的边缘点能充分反映目标物体的特征, 则取为匹配特征点。设由模板  $M$  和待匹配子图  $\tilde{I}$  的 3 个信息测度 (即邻域一致性测度、结构性测度和方向性测度, 以下用  $R$  代表邻域一致性测度,  $O$  代表方向性信息测度,  $C$  代表结构

性信息测度)得到的匹配特征点集分别为  $A_R, A_O, A_C$  与  $B_R, B_O, B_C$ 。

根据得到的匹配特征点集,就可构造如下 Hausdorff 距离,用于衡量图像的以下相似性:

$$\begin{aligned} H^{(R)}(A_R, B_R) &= \max\{h_{K_1}(A_R, B_R), h_{T_1}(B_R, A_R)\} \\ H^{(O)}(A_O, B_O) &= \max\{h_{K_2}(A_O, B_O), h_{T_2}(B_O, A_O)\} \\ H^{(C)}(A_C, B_C) &= \max\{h_{K_3}(A_C, B_C), h_{T_3}(B_C, A_C)\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $K_1, T_1, K_2, T_2, K_3, T_3$  的定义与式(8)中同。根据 3 种信息测度对边缘特征的贡献能力,构造如下加权匹配函数:

$$E = \min_k \{ \alpha_1 |H_k^{(R)}| + \alpha_2 |H_k^{(O)}| + \alpha_3 |H_k^{(C)}| \} \quad (12)$$

其中,  $\alpha_j (j=1, 2, 3)$  为加权因子,  $k=1, 2, \dots, S$  为模板图像在待匹配图像上的移动次数,  $H_k^{(R)}, H_k^{(O)}, H_k^{(C)}$  表示 3 种不同信息测度的模板图像与第  $k$  个可能匹配子图的 Hausdorff 距离,其定义如式(11)所示。式(12)中,加权因子体现了 3 种信息测度对边缘特征的分辨能力。由于结构性信息测度边缘分辨能力相对较强,而邻域一致性测度与方向性信息测度相对较弱,因此应用中,各加权因子分别取为  $\alpha_1=0.25, \alpha_2=0.25, \alpha_3=0.5$ 。

## 4 匹配策略

### 4.1 匹配预处理

由于待匹配图像中大部分区域为非重要区域,而对每一个待匹配子图通过直接计算 Hausdorff 距离来进行匹配不利于提高匹配速度,因此可利用一些总体信息作初步判断来剔除搜索过程中与模板存在明显区别的区域,如设定灰度值范围内像素点数比例、设定信息测度值范围内像素点数比例,或设定灰度值范围内像素点个数等。

以设定信息测度值范围内像素点数比例为例来说明。如图 1 所示,统计得到的各信息测度值域为  $[0, 150], [0, 300], [0, 60]$ , 模板内各测度处于  $[100, 150], [200, 300], [30, 60]$  内的比例分别为 8%、15%、5%。设当前区域保持匹配可能性的范围分别为  $[4\%, 12\%], [9\%, 20\%]$  和  $[1\%, 10\%]$ , 若采样比例超过预设范围,则表明该区域为匹配中非重要区域。由于可能存在缩放、变形等原因,因此通常上下界应根据搜索区域与模板尺寸的对比来动态地加以确定。

待匹配图像经过预处理过程,就剔除了非重要

区域,剩下的部分即为可能匹配子图。

### 4.2 定位搜索

虽然基于部分 Hausdorff 距离的匹配可实现模板与匹配区域子集合间的对应,但却不能保证定位的精确性。事实上,由于实际图像可能发生不同形式的变化,因此与潜在匹配子图相近的子区域(略大、略小或其他形式差异)都可能成为搜索结果。为提高定位精度,可采用以下方法来定位:首先在模板中心区域选取少量测试点,表示为测试点集合  $P_{\text{test}}$ ,并记录测试点间相对位置关系;然后利用 Hausdorff 距离  $H^{(R)}(P_{\text{test}}^{(R)}, \hat{P}_i^{(R)})$ 、 $H^{(O)}(P_{\text{test}}^{(O)}, \hat{P}_i^{(O)})$  及  $H^{(C)}(\hat{P}_{\text{test}}^{(C)}, \hat{P}_i^{(C)})$ , 在搜索得到的局部区域中寻找对应集合  $\hat{P}_{\text{test}}$ ; 最后按照  $P_{\text{test}}$  与  $\hat{P}_{\text{test}}$  的对应关系来确定模板  $M$  的精确匹配子图  $\tilde{P}$ 。

### 4.3 匹配步骤

根据上述分析,基于信息测度和 Hausdorff 距离的图像匹配步骤总结如下:

- (1) 边缘提取 根据模板  $M$  和待匹配图像  $I$  中目标物体的特点,选取合适的边缘检测方法,提取出目标物体的边缘。
- (2) 边缘点的信息测度特征提取;
- (3) 由提取到的信息测度特征,确定匹配特征点集;
- (4) 根据得到的特征点集,构造基于 Hausdorff 距离的相似度函数式(式(10)和式(11));
- (5) 匹配预处理;
- (6) 根据修正公式(式(9)和式(10))计算模板特征集和可能匹配子图特征集的 Hausdorff 距离;
- (7) 根据式(12)计算加权匹配函数  $E$ ;
- (8) 设定阈值  $E_0$ , 当  $E < E_0$  时,认为两点集匹配;否则,认为两点集不匹配;
- (9) 通过对得到的匹配子图进行定位搜索来确定精确匹配位置。

## 5 实验结果

图 3 为一个实际图像的匹配实例。图 3(a)为模板图像,大小为  $26 \times 24$ ;图 3(b)为待匹配图像,大小为  $147 \times 190$ 。邻域一致性测度、结构性测度和方向性测度的范围分别为  $R \in [0.33, 339.67]$ ,  $C \in [0.47, 891.42]$ ,  $O \in [1, 765]$ 。根据模板特征点的信息测度范围,取匹配预处理阶段各信息测度值域为  $R \in [7, 322]$ ,  $O \in [16, 728]$ ,  $C \in [343, 826]$ 。由

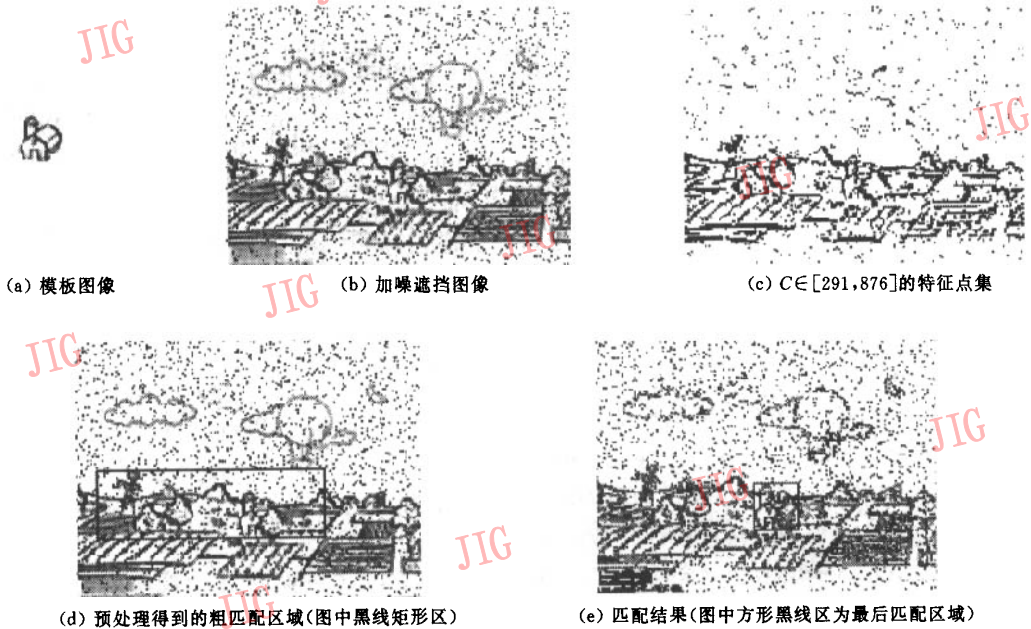


图 3 实际图像匹配示例

$C \in [343, 826]$ 得到的特征点集如图 3(c)所示。在该值域范围内,取特征点数比例为 10%时,得到的粗匹配区域如图 3(d)所示。取参数  $\delta=0.2, \tau=4$  时,其得到的匹配结果如图 3(e)所示。

表 1 为本文方法与部分 Hausdorff 距离以及  $\hat{d}_{Hausdorff}$  的匹配定位误差和匹配速度比较。由表 1 可以看出,本文提出的方法不仅速度快,定位准确,而且具有很好的匹配稳定性。

表 1 匹配定位误差与匹配速度比较

Hausdorff 距离形式	所选参数	匹配位置 (86,89)	时间(s)
部分 Hausdorff 距离	$f=0.5$	(87,79)	63
	$f=0.7$	(77,26)	
	$f=1$	(114,24)	
改进的 Hausdorff 距离	$\tau=1$	(74,22)	78
	$\tau=2$	(86,16)	
	$\tau=3$	(112,89)	
	$\tau=4$	(89,27)	
	$\tau=5$	(86,79)	
	$\tau=6$	(106,39)	
本文方法	$\delta=0.1, \tau=3$	(88,89)	13
	$\delta=0.1, \tau=4$	(87,89)	
	$\delta=0.1, \tau=5$	(86,89)	
	$\delta=0.1, \tau=6$	(100,12)	
	$\delta=0.2, \tau=3$	(86,89)	
	$\delta=0.2, \tau=4$	(86,89)	
	$\delta=0.2, \tau=5$	(87,89)	
$\delta=0.3, \tau=4$	(86,89)		
$\delta=0.3, \tau=5$	(86,89)		

## 6 结论

实验结果表明,基于信息测度和 Hausdorff 距离的图像匹配方法有以下特点:

(1) 通过引入信息测度提取边缘特征点,不仅提高了抗噪性能,而且较好地解决了传统 Hausdorff 距离匹配由噪声点、伪边缘、出格点造成的误匹配问题;

(2) 修正了 Hausdorff 距离,即根据模板和待匹配图像中信息测度特征,给出了一个参数选择的依据,从而从一定程度上克服了以往匹配参数选择的盲目性。实验表明,修正后的 Hausdorff 距离能准确匹配遮挡图像;

(3) 根据 3 种信息测度对边缘特征的贡献能力,构造了新的加权匹配函数;

(4) 匹配预处理大大加快了匹配过程。

## 参考文献

- Leese J A, Novak C S, Clark B B. An automated technique vor obtaining cloud motion vrom geosynchronous satellite data using cross correlation[J]. Journal ov Applied Meteorology, 1971, 10(2):118~132.
- Borgevors G. Distance transforms in digital images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 34(3): 344~371.

- 3 Huttenlocher D P, Klanderma G A, Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850~863.
- 4 Dubuisson M P, Jain A K. A modified Hausdorff distance for object matching [A]. In: 12th International Conference on Pattern Recognition[C], Jerusalem, Israel, 1994, 10:566~569.
- 5 Kwon O K, Sim D G, Park R H. Nonparametric hierarchical Hausdorff distance matching algorithm[J]. Optical Engineering, 2000, 39(7):1917~1927.
- 6 Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object matching algorithms using robust Hausdorff distance measures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3):425~429.
- 7 杨焯. 基于图像信息测度的多尺度边缘检测方法[J]. 模式识别与人工智能, 1998, 11(4): 442~446.
- 8 杨海军, 梁德群. 一种基于信息测度和神经网络的边缘检测方法[J]. 电子学报, 2001, 29(1):51~53.
- 9 汪亚明. 图像匹配的鲁棒型 Hausdorff 方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(3):238~241.



**王慧燕** 1975 年生, 2000 年获得山东大学电力工程学院工学硕士学位, 2003 年获得浙江大学电气工程学院工学博士学位, 现为浙江大学药学院药物信息学研究所博士后。主要研究方向为计算机视觉、模式识别、医学信息学等。

E-mail:cederic@zju.edu.cn



**程翼宇** 1958 年生, 博士生导师, 浙江大学药学院药物信息学研究所所长, 计算机辅助中药分析国家 III 级实验室主任, 中国中医药信息数字化专业委员会副主任。主要从事药理学、中药学、制药工程学、分子医学、信息科学及分析化学等多学科交叉领域的科学前沿研究, 发表学术论文 60 余篇, 其中被 SCI 收录 40 余篇。

E-mail:chengyy@zju.edu.cn