

文章编号 : 0253-2239(2002)11-1362-06

改进形态学相关算法以识别高相似度灰度图像*

余 杨 黄惟一

(东南大学仪器科学与工程系 , 南京 210096)

摘要 : 从形态学角度定义了灰度联合图像相似度 , 提出两种基于位表示法形态学相关算法的改进算法 , 通过提取位表示法的图像片边缘特征或二元化位表示法的图像片功率谱 , 以提高位表示法形态学相关算法对高相似度灰度图像的识别能力。

关键词 : 联合变换相关器 ; 数学形态学 ; 光学模式识别

中图分类号 : O438 文献标识码 : A

1 引 言

传统的线性相关(LC)对灰度图像的相关鉴别能力较低,一种称之为形态学相关(MC)的非线性相关技术引入模式识别^[1],提供了更好的鉴别能力,但其计算量较大。最近,报道了一种基于位表示法的改进型形态学相关(MMC)^[2],它具有比形态学相关更强的鉴别能力,较小的计算量,然而它对噪声较敏感。针对上述灰度图像识别的形态学算法,本文从形态学角度提出了灰度联合图像相似度定义及计算公式,从而把灰度图像的相似度问题转化为各层图像片的相似度问题。对灰度分布相近、形状相近的高相似度灰度图像的识别,由于各层图像片都具有高相似度,一般用形态学相关或位表示法形态学相关均难以识别。为提高位表示法形态学相关的识别效果,本文提出基于图像片边缘特征提取的 Roberts 算子位表示法形态学相关算法和基于二元化图像片功率谱的位表示法形态学相关算法。计算机模拟表明,上述算法对改善高相似度灰度图像的识别产生了明显效果。形态学相关也可作类似的改进。

2 形态学相关

设 $f(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 是灰度输入图像和参考图像, $f(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的线性相关可定义为

$$C(x, y) = f(x, y) \otimes r(x, y) = \sum_h \sum_l r(h, l) f(x+h, y+l) \quad (1)$$

其中 \otimes 表示线性相关运算。

$f(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的形态学相关可定义为

$$MC(x, y) = f(x, y) \ominus r(x, y) = \sum_h \sum_l \min[r(h, l), f(x+h, y+l)] \quad (2)$$

其中 \ominus 表示形态学相关运算。

通过运用取阈分解概念,形态学相关也可表示成线性相关之和^[1], $f(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的形态学相关也可表达为

$$MC(x, y) = \sum_{q=1}^{Q-1} t_q(x, y) \otimes r_q(x, y) = \sum_{q=1}^{Q-1} C_q(x, y) \quad (3)$$

其中 $Q = 256$ 为灰度级,

$$t_q(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x, y) \geq q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$r_q(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } r(x, y) \geq q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

此处 C_q 代表二值图像片 t_q 和 r_q 的线性相关。

位表示法形态学相关是形态学相关的一种改进算法,它并不是线性取阈分解,而是位表示法分解,例如,一个拥有灰度级强度 138 的图像像素(共有 256 级灰度),采用位表示法分解,将表示成 10001010,在相应的 8 片二值图像片中,其对应位置的值,在第 8、第 4、第 2 片中为 1,在其它片中为 0。运用位表示法分解,位表示法形态学相关可表示成线性相关之和^[2], $f(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 的位表示法形态学相关可表达为

$$MMC(x, y) = \sum_{g=1}^M t_g(x, y) \otimes r_g(x, y) = \sum_{g=1}^M C_g(x, y) \quad (6)$$

其中 M 是位表示法分解的二值图像片数量。

* 江苏省重点学科经费资助课题。

E-mail: seyysw@seu.edu.cn

收稿日期: 2001-10-29; 收到修改稿日期: 2002-01-16

位表示法形态学相关减小了计算量,节省了许多包含在形态学相关中的相关操作。灰度图像有 256 级灰度,计算形态学相关需要 256 片取阈二值图像,而计算位表示法形态学相关仅需要 8 片基于位表示法的二值图像。同时位表示法形态学相关改善了鉴别能力。如果我们假设 256 级灰度图像,仅一图像片变化,在形态学相关中,相关峰的变化为形态学相关峰值的 $1/256$,而在位表示法形态学相关中,相关峰的变化为位表示法形态学相关峰值的 $1/8$,可见,位表示法形态学相关鉴别率明显高于形态学相关情况。位表示法形态学相关对各种噪声变化敏感,这是由其高鉴别率特性决定的,形态学相关是平均绝对

值误差(MAE)最小化^[1],而位表示法形态学相关不是平均绝对误差最小化。

为使用联合变换相关器(JTC)平台获得位表示法形态学相关,将每对图像片(一片来自输入图像,另一片来自参考图像)并排播放到输入面上,对每对图像片进行光计算获得联合变换功率谱,这些图像片的联合变换功率谱之和存贮在计算机中,并且最后反馈回输入面进行第二次傅里叶变换以产生位表示法形态学相关。注意到同样步骤也可进行形态学相关过程。我们采用回旋结构联合变换相关器,构建的实验系统框图见图 1。

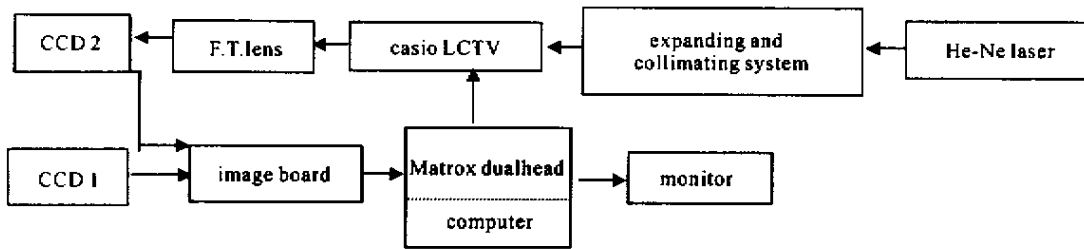


Fig.1 JTC experiment system

其中使用了最新 Matrox 双头显卡、Casio 液晶电视、无需外置电源的小巧型 He-Ne 激光器、 $\phi 100$ 傅里叶变换透镜、大恒图像卡等器件。

3 位表示法形态学相关的两种改进算法研究

在许多基于光学相关器的图像识别文献中,往往把光学相关和图像匹配相等同,但实际上“光学相关”和“图像匹配”是两个概念,图像匹配能保证光学相关峰的出现,但光学相关峰的出现不能保证图像一定匹配,即存在误判现象。如经典联合变换相关器(线性相关)对字符 E 和 F^[6]、相似的人脸^[5]和下文将提到的五角形、八角形等均无法识别。经典的匹配度量常用的有两个函数^[5],即互相关度量 CLM(f, g)和绝对差度量 ADM(f, g),两者基于数值计算来比较灰度图像的相似程度,直观性较差,为此本文根据联合变换相关器原理^[4],从形态学角度对灰度图像相似度进行定义。

首先将灰度联合图像[由灰度输入图像 $t(x, y)$ 和灰度参考图像 $r(x, y)$ 并排播放到输入面上组成,它们的中心分别位于 $(-d, \rho)$ 和 (d, ρ)]按取阈分解或位表示法分解(当然也可以是其他分解方法)划分成二值联合图像片[由二值输入图像 $t_n(x, y)$

和二值参考图像 $r_n(x, y)$ 组成,它们的中心分别取为 $(-d, \rho)$ 和 (d, ρ) , $n = 1 \sim N$, N 是二值联合图像片的数量],假设二值联合图像片逐片播放到输入面上,将其中的二值输入图像与二值参考图像中心重合进行平移填充,将较小图像看作结构核填充到较大图像中,可能完全包含或不完全包含或完全不包含。对于两填充二值图像,对应像素点有相同值的像素点集合称为二值输入图像与二值参考图像的匹配图像部分,匹配区域像素点总和记为 S_{pn} ;对应像素点有不同值的像素点集合,称为二值输入图像与二值参考图像的非匹配图像部分,非匹配区域像素点总和记为 S_{fn} ,两部分之和称为二值输入图像与二值参考图像的填充并集图像,并集区域像素点总和记为 S_{bn} ,并有

$$S_{pn} + S_{fn} = S_{bn}$$

定义二值联合图像片相似度 k_n 的一般表达式为

$$k_n = S_{pn} / S_{bn}$$

其中 $0 \leq k_n \leq 1$,当二值联合图像片完全匹配时, $k_{n(\max)} = 1$ 。据此灰度联合图像相似度 K 可表达为

$$K = \sum_{n=1}^N k_n$$

其中 $0 \leq K \leq N$, N 为二值联合图像片的数量,其大小由图像灰度级及其分解方法决定,当灰度联合

图像完全匹配时, $K_{\max} = N$ 。可以看到只要确定灰度输入图像 $I(x, y)$ 和灰度参考图像 $r(x, y)$ 的中心和范围, 再分层进行对应像素值的比较, k_n 和 K 的计算很容易编程实现。

当 $n = q, N = Q - 1$ 时为形态学相关情形, 当 $n = g, N = M$ 时为位表示法形态学相关情形。可以看到以上提出的相似度定义方法较绝对差度量更加直观, 更易于结果分析, 且可研究不同灰度段的相似度。对灰度分布相近、形状相近的灰度输入图像和灰度参考图像, 其灰度图像的相似度 K 较高接近 N (完全匹配时 $K_{\max} = N$), 一般用形态学相关或位表示法形态学相关难以识别。本文提升位表示法形态学相关算法以识别此类图像。

3.1 基于 Roberts 算子的位表示法形态学相关算法

灰度联合图像相似度 K 由二值联合图像片相似度 k_n 决定, 对于具有高相似度的二值联合图像片 (k_n 接近于 1) 如果能将其转化为具有低相似度的二值联合图像片 (如 k_n 接近于 0.6) 则将使高相似度灰度联合图像的 K 值明显下降, 从而使灰度图像易于得到识别。

在此我们用边缘检测方法来突出二值联合图像片的特征, 使 S_{pn} 减小, S_{fn} 增大, 以降低相似度 k_n 。据此, 提出一种对基于位表示法的各层图像片提取特征的改进型形态学相关, 本文称之为基于 Roberts 算子的位表示法形态学相关 (RMMC)。对基于位表示法的每对图像片 (一片来自输入图像, 一片来自参考图像) 进行 Roberts 边缘检测, 获取经 Roberts 边缘检测后的每对图像片联合变换功率谱的总和, 再作逆傅里叶变换得到相关输出。

由于 Roberts 边缘增强是梯度运算的近似, 因此根据 (6) 式, 基于 Roberts 算子的位表示法形态学相关可表达为

$$\text{RMMC}(x, y) = \sum_{g=1}^M t'_g(x, y) \otimes r'_g(x, y), \quad (7)$$

3.2 基于功率谱二元化的位表示法形态学相关算法

对于高相似度灰度图像, 如果无法降低二值联合图像片的 k_n 值, 则应当提高联合变换相关器对二值联合图像片的识别能力。受二元联合变换相关器^[3] 较经典联合变换相关器有更强的识别能力启发, 提出对基于位表示法的图像片 (一片来自输入图像, 一片来自参考图像) 功率谱进行二元化的两种改进型形态学相关, 本文称之为基于功率谱二元化的位表示法形

态学相关 (BMMC₁ 和 BMMC₂)

1) BMMC₁ 算法

一种是对基于位表示法的每对图像片功率谱求和后进行二元化, 再作逆傅里叶变换得到相关输出。根据 (6) 式, 每对图像片功率谱可表达为

$$I_g(u, v) = |S_g(u, v)|^2 = |T_g(u, v)|^2 + \exp\left[i\frac{4\pi}{\lambda f}du\right] T_g(u, v) R_g^*(u, v) + \exp\left[-i\frac{4\pi}{\lambda f}dv\right] T_g^*(u, v) R_g(u, v) + |R_g(u, v)|^2. \quad (8)$$

根据 (8) 式, 各对图像片功率谱之和可表达为

$$I_{\text{sum}}(u, v) = \sum_{g=1}^M I_g(u, v), \quad (9)$$

如果以每对图像片功率谱之和的谱面中值为阈值 T_{sum} , 对功率谱之和进行二元化可表达为

$$E_{\text{sum}}(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } I_{\text{sum}}(u, v) \geq T_{\text{sum}} \\ 0 & \text{if } I_{\text{sum}}(u, v) < T_{\text{sum}} \end{cases} \quad (10)$$

对 $E_{\text{sum}}(u, v)$ 作逆傅里叶变换得到功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关 (BMMC₁)

2) BMMC₂ 算法

也可对基于位表示法的每对图像片功率谱二元化后求和, 再作逆傅里叶变换得到相关输出。

如果以每对图像片联合变换功率谱谱面中值为阈值 T_g , 每对图像片的二元联合变换功率谱可以表达为

$$E_g(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } I_g(u, v) \geq T_g \\ 0 & \text{if } I_g(u, v) < T_g \end{cases} \quad (11)$$

求和每对图像片功率谱 $\sum_{g=1}^M E_g(u, v)$, 再进行逆傅里叶变换得到功率谱二元化后求和的位表示法形态学相关 (BMMC₂)

与经典位表示法形态学相关相比, 基于 Roberts 算子的位表示法形态学相关和基于功率谱二元化的位表示法形态学相关对高相似度灰度图像的识别能力明显增强。由于位表示法形态学相关较形态学相关的图像片数量由 $N = 2^n$ 降至 $n = \log_2 N$, 因此与图像片数量相同的预处理次数不至于增加太多计算量, 尤其是功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关无论图像片数量的多少, 仅增加一次谱面二元化运算。

以上算法对形态学相关同样适用, 只要对每对图像片或每对图像片功率谱进行类似处理即可, 但由于形态学相关图像片数量远较位表示法形态学相

关多,从而使计算量较大。

4 计算机模拟结果

本文构建一组仿真目标,其基本形状如图 2 所示,该基本形状可类似于字符目标用作基础研究,基本形状的变形,基本形状的孔添加,基本形状的纹理添加,基本形状的变形、孔添加、纹理添加几种方式的组合可模拟难易不同的待识别目标。人脸仿真目标可以看作是在上述基本形状圆基础上的变形、孔添加和纹理添加。



Fig.2 Basic shape

采用具有 16 级灰度的基本形状图像、人脸图像

进行计算机模拟,实现形态学相关需要取阈相关 16 片二值图像片,而实现位表示法形态学相关仅需要求 4 片二值图像片的相关。模拟运算基于 64×64 的快速傅里叶变换,输入图像和参考图像尺寸各为 12×12 ,具有 16 级灰度,相关峰均采用振幅输出,图 3~图 6 中,中间峰为 0 级项,两侧峰为相关峰。

对高相似度 16 级灰度五角形和八角形,用位表示法形态学相关识别效果不佳,如图 3 所示。

采用基于 Roberts 算子的位表示法形态学相关可以识别 16 级灰度五角形和八角形,如图 4 所示。

采用功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关识别 16 级灰度五角形和八角形可以获得很好的识别效果,如图 5 所示。

对 16 级灰度人脸,采用功率谱二元化后求和的位表示法形态学相关比采用功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关能产生更好的识别效果(图 6)。

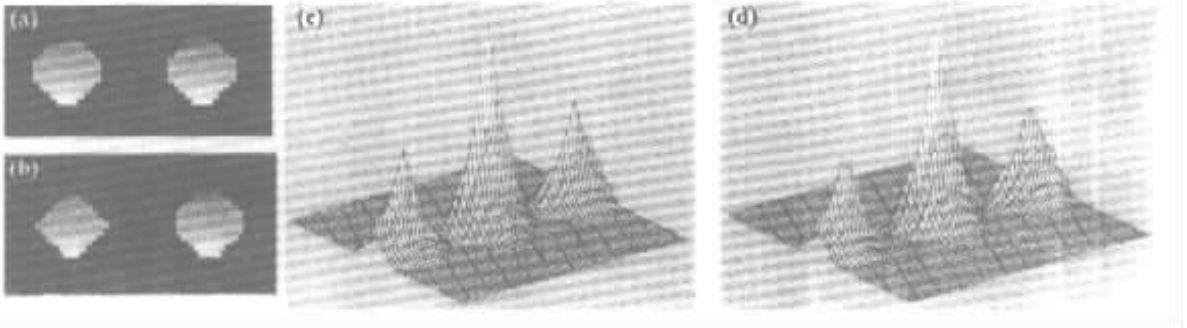


Fig.3 MMC recognition results. (a)(b)Input joint image;(c) Autocorrelation peak for the octagon;(d) Cross correlation peak for the pentagon

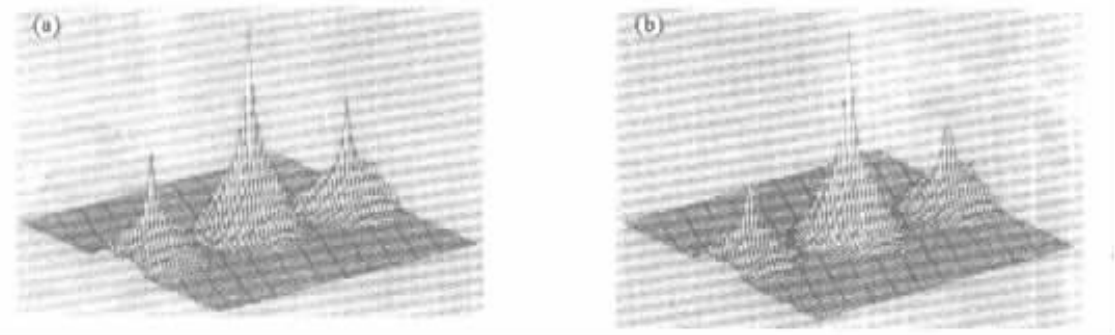


Fig.4 RMMC recognition results. (a) Autocorrelation peak for the octagon;(b) Cross correlation peak for the pentagon

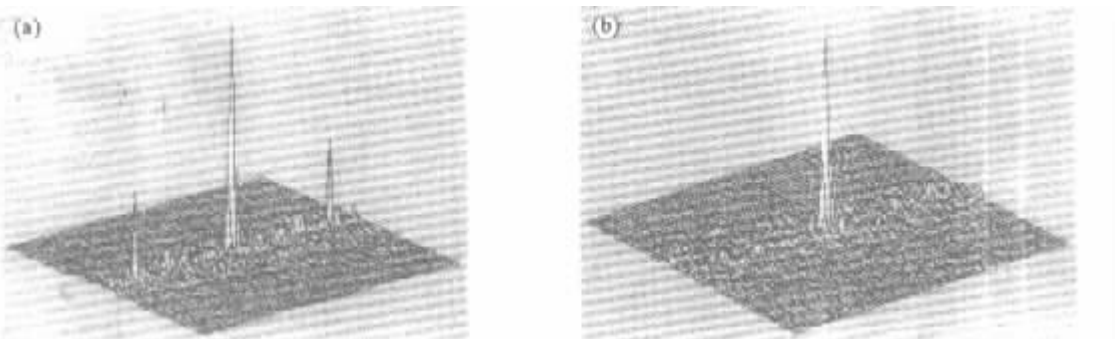


Fig.5 BMMCl recognition results. (a) Autocorrelation peak for the octagon;(b) Cross correlation peak for the pentagon

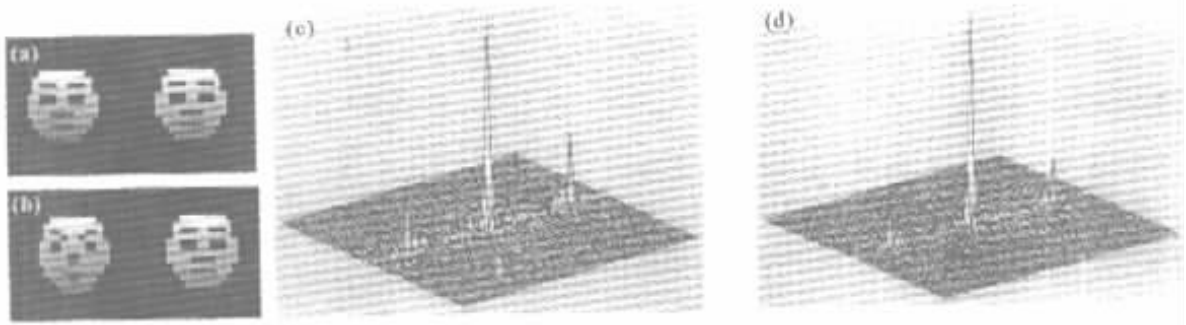


Fig.6 BMMC2 recognition results for the faces. (a),(b) Input joint images ;(c) Autocorrelation peak for the same face ; (d) Cross correlation peak for the unlike face

以信噪比(PSR)、0级项与相关峰强度比(dc/Peak)、光能效率(η_E)、鉴别率(Δ_p)作为各种位表示法形态学相关的评价标准,表1给出了上述各种位表示法形态学相关的性能比较模拟结果。对于高相似度灰度八角形和五角形的识别,采用本文提出的基于Roberts算子的位表示法形态学相关、功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关(BMMC₁)、功率谱二元化后求和的位表示法形态学相关(BMMC₂)、鉴别率较经典位表示法形态学相关分别

提高了约17%、54%、60%。其它评价参量也都有大幅度的改善。再用具有高鉴别率的功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关(BMMC₁)、功率谱二元化后求和的位表示法形态学相关(BMMC₂)识别高相似度灰度人脸,功率谱求和后二元化的位表示法形态学相关的鉴别率可达到约44%,功率谱二元化后求和的位表示法形态学相关的鉴别率接近60%,已可以识别。

Table 1 Correlation results of modified morphological correlators

type of MMC	input image		PSR		dc/Peak		$\eta_E/\%$		$\Delta_p/\%$
MMC	octagon and octagon	octagon and pentagon	36.78	30.48	4.00	5.25	1.86	1.55	36.82
RMMC	octagon and octagon	octagon and pentagon	68.42	43.16	4.00	7.28	3.58	2.28	53.76
BMMC ₁	octagon and octagon	octagon and pentagon	289.99	22.94	6.71	93.47	27.02	2.41	91.10
	same faces	unlike faces	288.31	169.65	7.68	12.47	30.65	17.14	43.83
BMMC ₂	octagon and octagon	octagon and pentagon	303.39	9.77	7.75	291.92	34.79	1.56	96.66
	same faces	unlike faces	281.53	113.58	8.38	23.84	32.40	16.36	58.85

PSR is ratio of correlation peak intensity to average intensity of noise (sidelobe). dc/peak is ratio of dc to correlation peak intensity. η_E is ratio of correlation peak intensity to illumination energy. $\Delta_p = (I_{AP} - I_{CP})/I_{AP}$, I_{AP} is the autocorrelation-peak intensity and I_{CP} is the maximum cross-correlation-peak intensity.

结论 本文从形态学角度定义了灰度联合图像相似度,通过提取基于位表示法的图像片边缘特征或二元化基于位表示法的图像片功率谱,以提高位表示法形态学相关对高相似度灰度图像的识别能力。计算机模拟结果表明,改进后的算法使识别效果明显改善。

参 考 文 献

[1] Zhang S, Karim M A. Illumination-invariant pattern recognition with joint-transform-correlator-based morphological correlation. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(35): 7228 ~ 7236

[2] Shemer A, Mendlovic D, Shabtay G. Modified morphological correlation based on bit-map representations. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(5): 781 ~ 787

[3] Javidi B, Wang J. Binary nonlinear joint transform correlation with median and subset median thresholding. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(8): 967 ~ 976

[4] Song Feijun, Jutamulia S. *Advanced Optical Information Processing* (近代光学信息处理). Beijing: Peking University Press, 1998. 78 ~ 91 (in Chinese)

[5] Cheng Gang, Jin Guofan, Wu Minxian. Joint transform correlator for optical gray-scale image matching. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9): 1236 ~ 1243 (in Chinese)

[6] Cheng Gang, Yuan Shifu, Wu Minxian. Joint hit-or-miss transform correlator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(3): 318 ~ 324 (in Chinese)

High Similarity Gray-Scale Image Recognition with Modified Morphological Correlation

Yu Yang Huang Weiyi

(*Instrument Science and Engineering Department , Southeast University , Nanjing 210096*)

(Received 29 October 2001 ; revised 16 January 2002)

Abstract : Gray-scale joint image similarity degree is defined according to the morphology method. Two kinds of modified morphological correlation algorithm based on bit-representation decomposition are presented. The gray-scale image is decomposed into a set of binary slices in the bit-representation decomposition. In the first algorithm , the edge of each pair of slices is detected. In the second algorithm , the joint power spectrum of each pair is summed after binarized or the summation of the joint power spectrum of these pairs is binarized. Computer-simulation results indicate that the modified algorithms can improve the discrimination capabilities with respect to the high similarity gray-scale images.

Key words : joint transform correlator ; mathematical morphology ; optical pattern recognition