

基于相似性度量的灰度图像光学匹配运算

成 罡 金国藩 邬敏贤 何庆生 刘海松 严瑛白

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京,100084)

TP391.41

摘要 利用非相干光相关操作处理和空间移位编码方法,实现了基于相似性度量的灰阶图像匹配处理. 针对不同程度的噪声干扰情况,分析了空间移位编码方法中字长的选择问题,提高了识别的抗畸变能力,给出了基于非相干相关系统的实验示例.

关键词 相似性度量, 空间移位编码方法, 光学相关器, 光学模式识别, 灰阶图像.

光学匹配

引言

图像识别大体上可以分为特征匹配和图像匹配两种方法. 特征匹配的匹配效率高, 稳定性好, 对图像的各种非本质变化(旋转、缩放和光照强度变化等等)不敏感, 是计算机采用的主要方法. 图像匹配能利用图像中的所有信息, 区分不同对象的能力强, 精度高, 特别是在十分复杂的图像环境下有效地工作, 是光学识别的主要方法.

光学图像识别进行图像匹配处理具有一定的优越性, 如并行性、速度快和容量大等, 是当前的研究热点^[1]. Vanderlugt 滤波器、联合变换相关器和非相干相关器是 3 种典型的用于执行图像识别的光学结构, 最近几年人们又提出了许多用于模式识别的实时光学相关器^[2~10]. 相干光的相关器基于傅氏变换和频域处理, 结构比较复杂庞大, 且有很大的相干噪声, 为了实现紧凑型的识别系统, 已大量研究非相干光相关系统^[8~10].

在非相干光相关系统中, 两幅图像之间的“相关运算”往往无法得到正确的结果. 在某些特定情况下, 输入图像与参考图像进行相关可以找出相匹配的模式. 但是在大多数情况下, 直接进行相关会产生误判现象, 例如: 一个灰阶图像与一幅全白图像的互相关峰一定大于灰阶图像的自相关峰. 在二值图像处理中, 人们引入了归一化处理^[1~5]和形态学击中击不中变换^[6~9]有效地解决了这个问题, 使得只有目标图像与参考图像达到最近匹配相关峰才达到最大值, 但是这两种改进方法在应用到灰阶图像匹配识别时却很麻烦.

本文利用空间移位编码方法在非相关结构上, 实现了基于相似性度量的灰阶图像的匹配处理, 克服了直接相关出现的误判现象; 针对不同程度的噪声干扰情况, 分析了空间移位编码方法中字长的选择问题, 最后给出计算机模拟和实验结果.

1 基于相似性度量的图像匹配技术和空间移位编码方法

本文用 $X \nabla R$ 来表示输入图像 X 和模板 R 之间的图像匹配运算. 通常 X 尺寸大于 R

• 国家自然科学基金(编号 69775008)、国家高科技研究和发 展计划(编号 863-307-02)资助项目
稿件收到日期 1997-12-19, 修改稿收到日期 1998-04-06

尺寸,将 R 在 X 中进行全方位的平移,当 R 处于某一位置时,即和相应 X 的窗口图像进行匹配度量操作 $\text{Match}()$,输出值就反映了当前位置上的匹配关系,如

$$[X \nabla R](s, t) = \text{Match}(W(X, s, t, p, q), R), \quad (1)$$

式中 $[X \nabla R](s, t)$ 为匹配结果中坐标为 (s, t) 的值; p 和 q 分别为 R 的宽度和高度; $W(X, s, t, p, q)$ 表示 X 上中心点位置为 (s, t) 的窗口图像,其宽度和高度等于 R 的宽度和高度.当模板 R 在整幅图像 X 上搜索一遍后,输出图像就标明 X 的不同位置与 R 匹配的情况.

如何定义灰阶图像之间的匹配度量操作 $\text{Match}()$ 是实现图像匹配的关键.本文引入相似性度量 $SM(W, R)$ 以衡量灰阶窗口图像 W 和模板 R 之间的相同性. $SM(W, R)$ 值越大表示 W 与 R 越相似,有

$$SM(W, R) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q W(i, j) \# R(i, j), \quad (2)$$

式(2)中符号 $\#$ 表示两个灰阶像素点之间“模糊相似度关系”,定义为

$$x \# y = \begin{cases} m - n, & |x - y| = n \leq m \\ 0, & |x - y| = n > m \end{cases} \quad (3)$$

式中 m 为给定变量.按照式(3),不同取值的灰阶像素之间的相互关系构成了一个对角线上元素为每行每列中最大值的模糊矩阵 C ,并且每行每列均满足三角型隶属函数关系,即

$$C_{iy} = \begin{cases} i/m + (m - y)/m, & y - m \leq i \leq y \\ -i/m + (m + y)/m, & y \leq i \leq y + m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{xj} = \begin{cases} j/m + (m - x)/m, & x - m \leq j \leq x \\ -j/m + (m + x)/m, & x \leq j \leq x + m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式(4)中 C_{iy}, C_{xj} 分别表示矩阵 C 中第 y 和第 x 行的系数.

m 的选择对于匹配处理中的抗畸变能力有很大的关系.首先,当需要进行图像 X 和模板 R 之间的精确匹配时, X 和 R 受到噪声等畸变干扰的影响很小,相应像素点的灰度值保持不变,采用 $m=1$ 来实现输入图像和模板之间的点匹配处理,从而模糊关系矩阵 C 转变为一个布尔关系矩阵,这时匹配的精确度最高,但是容错能力最低.其次,当图像和模板之间图像亮度的动态范围有很小程度的变化时,图像和模板之间相应像素点的灰度值可能会有小的差异,可以采用 $m=1$ 或 2 等较小值来改善系统的抗畸变的能力,这时的匹配精确度就降低了.最后,当图像亮度的动态范围有相当程度的变化时,采用 $m=L$ 来改善系统的抗畸变能力,这时的匹配精确度最低,但是容错能力最高.

将相似性度量 $SM(W, R)$ 带入式(1),得到基于相似性度量的灰阶图像匹配表示式

$$[X \nabla R](s, t) = SM(W(X, s, t, p, q), R). \quad (5)$$

如何利用光学相关结构来实现相似性度量,是本文需要解决的关键问题.我们首先提出一种空间移位编码方法,设数字图像 I 的灰阶级次为 L ,其中灰阶值为 $i(0 \leq i \leq L-1)$ 的像素点

可以用字长为 $L+m-1$ 的空间移位编码 $[b_{L+m-2} \ b_{L+m-3} \ \dots \ b_1 \ b_0]$ 来表示,其中从第 i 位到第 $i+m-1$ 位为 1,长度为 m ,其余的码位上都是 0.例如:灰阶级次为 16 的图像中,灰度值为 10 的像素点的空间移位编码方法(字长为 19, $m=4$)的表示为 $[0000011110000000000]$. 编码方法中的“0”和“1”表示光线通过调制模板时,分别为“断”和“通”状态.当灰阶像素点 x 和 y 分别采用字长为 $L+m-1$ 的空间移位编码来表示时,得到编码向量 X_i 和 Y_i ,则它们之间按位相乘和迭加运算满足如下关系:

$$[X_i] \times [Y_i]^T = \begin{cases} m-n, & |x-y| = n \leq m \\ 0, & |x-y| = n \geq m \end{cases} \quad (6)$$

从式(3)和(6)可以看到,采用字长为 $L+m-1$ 的空间移位编码方法,不同取值的灰阶像素点之间按位相乘和迭加运算满足模糊相似度关系.实际上,按位相乘和迭加运算就是光学相关运算.因此,将待处理的灰阶图像采用字长为 $L+m-1$ 的空间移位编码方法来表示,则可以利用光学相关系统实现基于相似性度量的灰阶图像匹配识别.

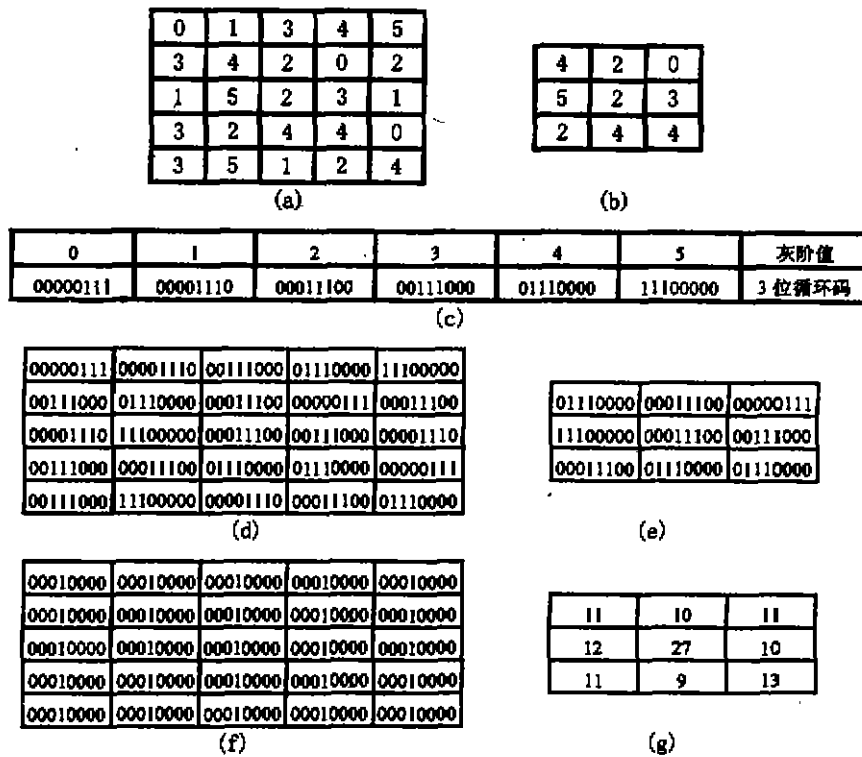


图 1 基于相似性度量的图像匹配识别实例
Fig. 1 Example of image matching based on similitude measurement

2 灰阶图像匹配处理

设灰阶图像 X 和模板 R 分别采用字长为 $L+m-1$ 的空间移位编码方法表示,得到编码图像 X_i 和 R_i ,则 X 与 R 之间基于相似性度量的灰阶图像匹配识别操作可表示为

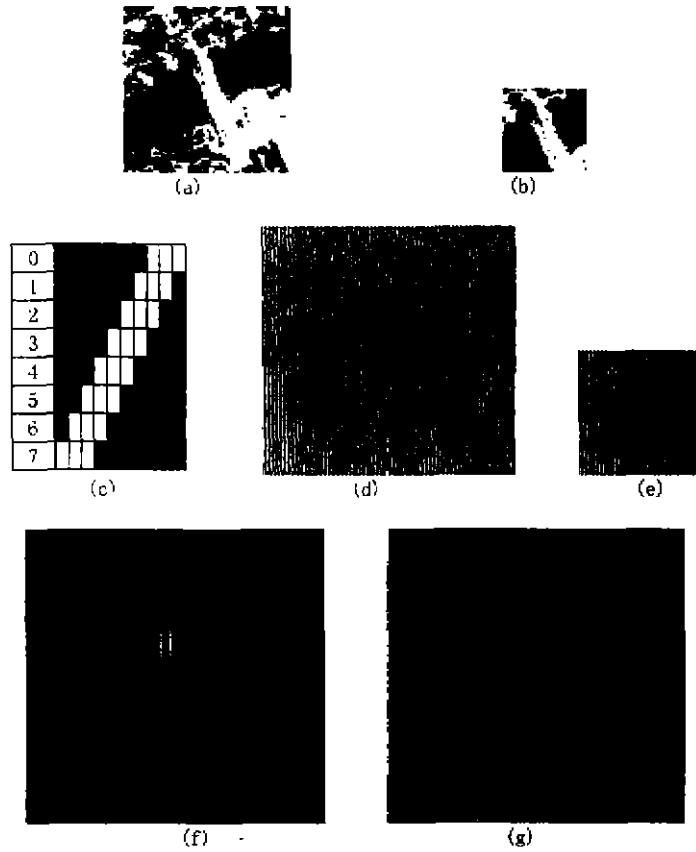


图2 基于相似性度量的图像匹配识别的计算机模拟
Fig. 2 Computer simulation of image matching based on similitude measurement

$$X \nabla^{SM} R = (X_e \star R_e) \cap M_d, \quad (7)$$

其中 ∇^{SM} 表示基于相似性度量的灰阶图像匹配识别操作, M_d 为取决于编码格式的解码模板.图1为一个基于相似性度量的灰阶图像匹配识别操作的例子,(a)和(b)分别给出输入的灰阶图像 X 和灰阶参考图像 R ,其中的灰阶层次为6(从0~5),(c)给出了字长为8的空间移位编码方法,(d)和(e)分别表示编码后得到的图像 X_e 和 R_e ,(f)为解码模板 M_d ,(g)给出了匹配识别结果 $(X_e \star R_e) \cap M_d$.对输出结果进行阈值分割,就可以反映图像中具有不同程度相关性特征点的位置分布情况,表示为

$$[X \nabla^{SM} R] |_{T=\lambda} = \begin{cases} X \nabla^{SM} R(m, n) = 1, & X \nabla^{SM} R(m, n) \geq \lambda \\ X \nabla^{SM} R(m, n) = 0. & X \nabla^{SM} R(m, n) < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

其中 $[X \nabla^{SM} R] |_{T=\lambda}$ 表示对 $X \nabla^{SM} R$ 的结果进行阈值为 λ 的分割处理,而 $X \nabla^{SM} R(m, n)$ 表示 $X \nabla^{SM} R$ 中位置为 (m, n) 的点的数值,显然, $[X \nabla^{SM} R] |_{T=\lambda}$ 得到的是图像 X 和模板 R 的完全匹配结果.匹配结果中只在完全匹配的地方出现最高相关峰,标志着匹配的位置.一般情况下,最高相关峰位于解码板的有效读出位内,为了简化处理步骤,不需要解码处理过程

M_d , 可将式(7)和(8)简化为

$$[X \nabla^{SM} R] |_{T=\lambda} = (X_c \star R_c) |_{T=\lambda} \quad (9)$$

对于灰阶图像匹配, 输出结果受到匹配像素数目和像素匹配灰度值两个变量的影响, 当图像和模板之间图像亮度的动态范围有很小程度的变化时, 即受到噪声等畸变干扰时, 图像和模板之间相应像素点的灰度值可能会有小的差异, 我们通过降低分割阈值的方法来改善系统的抗畸变能力. 当 $\lambda < mpq$ 时, $[X \nabla^{SM} R] |_{T=\lambda}$ 可以匹配具有差异为 e 的图像, 其中

$$e = \frac{mpq - \lambda}{mpq} \times 100\% \quad (10)$$

按照待处理图像的具体情况, 适当选择式(9)中阈值 λ , 可以获得较好的抗畸变干扰性能. 虽然通过降低阈值 λ 可以获得较好的抗畸变能力, 但是我们必须认识到基于模板匹配方法的抗畸变能力是很有限的, 无法和综合判别函数方法相媲美.

3 计算机模拟和光学实现

本文对基于相似性度量的灰阶图像匹配算法进行了计算机模拟. 图 2(a)显示了一个尺寸为 64×64 的 8 灰阶的输入场景图像 X ; (b) 为尺寸为 32×32 的 8 灰阶的待匹配桥梁图像 R ; 在模拟运算中, 我们采用了字长为 11 的空间移位编码方法, 见(c); (d) 和(e) 分别表示编码后得到的图像 X_c 和 R_c ; (f) 为模拟结果; (g) 对(f) 中的结果进行 $\lambda = 3072$ 阈值处理的结果, 从中可以清楚地看到匹配点的位置.

我们同样模拟了 $\lambda < mpq$ 阈值处理的容错能力, 将待分析的场景图像 X 加入 30% Gauss 噪声干扰和 8° 的旋转畸变, 我们发现桥梁仍然可以被正确的识别.

基于相似性度量的灰阶图像匹配处理的基本操作是相关运算, 本文选用非相干光相关器实现式(9)中匹配处理, 系统结构见文献[8, 9]. 实验中, 带有 8° 旋转畸变的图像 X 进行编码处理得到 X_c . 选择图 2(f) 的编码参考图像 R_c 作为待识别的目标, 在非相干光相关器的输出面上得到了输入 X_c 和 R_c 的相关图像, 并通过一个 CCD 摄像机和图像采集卡输入到计算机, 通过软件实现阈值分割处理, 获得了图像匹配结果. 在图 3(a) 给出了 $X_c \star R_c$ 的实验结果, (b) 是对(a) 进行阈值分割后得到的结果, 从中可以清楚的看到正确的识别结果.



图 3 基于相似性度量的图像匹配识别的光学实验结果

Fig. 3 Optical experimental result of image matching based on similitude measurement

4 结语

我们利用字长为 $L+m-1$ 的空间移位编码方法实现了基于相似性度量的灰阶图像匹配处理,针对不同程度的噪声干扰情况,分析了字长的选择问题,从而提高了灰阶目标识别抵抗各种畸变干扰的能力.本方法适用相干光和非相干光相关系统,本文给出非相干光相关器的实验示例.由于运算中采用的是二值编码形式的循环码,模板的实时写入很容易,可以很方便地构建紧凑型实时灰阶图像识别系统.

REFERENCES

- 1 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*. New York, McGraw-Hill, 1968
- 2 YU F T, SIU X L. *Opt. Commun.*, 1984, **52**(1): 10~16
- 3 Javidi B, Horner J L, Walkup J F. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(6), 1752~1756
- 4 CHENG Gang, et al. *Acta Optica Sinica*(成罡,等. *光学学报*), 1997, **17**(3), 318~324
- 5 Dickey F M, Romero L A. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(15), 1186~1189
- 6 Casasent D, Sturgill R. *Proc. SPIE*, 1989, **1153**, 500~510
- 7 Casasent D, Schaefer R, Sturgill R. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(29), 6225~6263
- 8 LIU L. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(10), 3447~3455
- 9 CHENG Gang, et al. *High Technology*(成罡,等. *高技术通讯*), 1997, **3**(2), 18~21
- 10 WU Min-Xian, YUAN Shi-Fu, YAN Ying-Bai, et al. *Proc. SPIE*, 1996, **2751**, 264~270

OPTICAL GRAY-SCALE IMAGE MATCHING BASED ON SIMILITUDE MEASUREMENT*

CHEN Gang JIN Guo-Fan WU Min-Xian HE Qing-Sheng
LIU Hai-Song YAN Ying-Bai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract The problem of gray-scale image matching based on similitude measurement was discussed. Using an incoherent optical correlator and a shift-encoding method, the processing of gray-scale image matching based on similitude measurement was realized. The selection of the length of shift-encoding for different distortion in gray-level object recognition was analyzed. The optical experimental results were given.

Key words similitude measurement, shift-encoding method, optical correlator, optical pattern recognition, gray-scale image.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the National Research and Development Program of High-Technology of China

Received 1997-12-19, revised 1998-04-06