

An Image Matching Method of New Illumination-Robust and Anti-Blur Combined Moment Invariants *

LIU Huan^{1,2}, HAO Kuangrong^{1,3*}, DING Yongsheng^{1,3}, MAO Min¹

(1. Institute of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Institute of Electronic and Information Engineering, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi 343009, China;

3. Engineering Research Center of Digitized Textile and Fashion Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Novel combined moment invariants are put forward to deal with the problem of the poor adaptability to the illumination variation and the blur noise in the cases of the conventional image feature matching. The new combined moment invariants are re-built on the basis of Hu moments and are applied in image matching. The experimental results have demonstrated that, in virtue of its illumination robustness and blur invariance, the proposed approach can effectively overcome the decline of the correct matching rate influenced by both the illumination change and the fuzzy noise. Ensuring the high precision, the matching efficiency is greatly improved. Utilizing the new combined moment invariants as image descriptors to complete image matching is feasible and validate. It offers a nice reference value.

Key words: computer vision; image matching; combined moment invariant; illumination-robust; blur invariance

EEACC: 7210; 7230G

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.09.016

光照鲁棒的抗模糊新组合不变矩图像匹配方法 *

刘欢^{1,2}, 郝矿荣^{1,3*}, 丁永生^{1,3}, 毛敏¹

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 井冈山大学电子与信息工程学院, 江西吉安 343009;

3. 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

摘要: 基于特征的传统图像匹配方法对环境光照变化和模糊噪声适应性较差, 针对该问题提出了一种新组合不变矩。在 Hu 不变矩的基础上, 重新组合构造出 3 个新组合不变矩并将其应用到图像匹配中。实验结果表明, 这种新组合不变矩具有很好的光照鲁棒性和模糊不变性, 能够有效地解决受光照变化和模糊噪声共同影响造成的匹配率下降问题; 在保证高精度的前提下, 匹配效率大大提高。该不变矩作为图像特征的描述形式进行图像匹配是有效可行的, 具有良好的参考价值。

关键词: 计算机视觉; 图像匹配; 组合不变矩; 光照鲁棒性; 模糊不变性

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)09-1258-07

图像匹配是目标检测、计算机视觉、图像处理等诸多领域中十分关键的工作。图像匹配的实质是在待测图像中寻找与参考图像相似模式的过程^[1]。图像匹配技术主要分为两类: 基于区域灰度匹配^[2-3]和基于特征匹配^[4-5]。前者对图像的灰度变化比较敏感, 运算量较大; 后者提取图像的显著特征, 适应性强、数据量小, 与基于区域灰度匹配的算法相比, 运算量较小, 被广泛地应用于图像匹配中。基于特征的图像匹配主要包括特征点提取和特征描

述两个过程, 其中, 特征描述子的构造是关键。

在实际采集图像时, 常伴有光线变化和模糊噪声的干扰。前者是由于光照变化或相机曝光不均以及多相机之间的光感性能差异, 使得同一物体同时成像所获得的图像存在亮度变化; 后者是图像受成像系统聚集、大气湍流等因素影响变得模糊。解决图像匹配时光照条件变化的常用方法有图像预处理和提取图像梯度信息。其中图像预处理的技术有浮雕化处理^[6]、直方图均衡化^[7]等。这些方法的主要缺点是图

项目来源: 国家自然科学基金重点项目(61134009); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1220); 上海市优秀学术带头人计划项目(11XD1400100); 上海领军人才专项资金项目(11JC1400200); 上海市科学技术委员会重点基础研究项目(13JC1407500)

收稿日期: 2013-05-28 修改日期: 2013-08-02

像细节信息消失,有用信号的对比度降低。提取梯度信息的方法在图像亮度较低、噪声严重情况下梯度信息的获取非常困难,性能受到较大影响。除了图像预处理和提取图像梯度信息这两种方法外,最近有些研究者提出一些新的方法,文献[8]从多尺度几何分析和自适应滤波的角度提取人脸图像的光照不变特征,消除光照变化对人脸识别的影响。该方法能够保持良好的边界特征和几何结构,但在光照变化比较大时,效果并不理想。又有文献[9]将光照和对比度不变性的相位一致性变换引入多级景象匹配中,配准精度较高,但这种方法在选择合适的滤波波长时存在较大难度。针对图像模糊常用的处理方式是在图像匹配之前去除模糊引起的图像退化,如点扩散函数 PSF (Point Spread Function)、逆滤波、投影复原法等。但通常大部分的去模糊函数参数无法确定,以至于这类方法的精度和稳定性都较难保证。为了解决光照变化和模糊现象给匹配带来的困难,文献[10]提出用带符号对比上下文直方图构成 32 维的特征描述子完成图像匹配,对图像的亮度和模糊变化具有不变性,同时匹配速度得到了一定程度的提高,但是在提高速度的同时算法的鲁棒性出现了不同程度的下降。综上,探寻一种高匹配效率,又对光照变化和模糊保持不变性的特征描述子具有重要的现实意义,是图像匹配工作亟待解决的问题。

图像不变矩是一种高度浓缩的图像特征,被广泛运用于图像匹配中。经典的不变矩有 Hu 不变矩, Legendre 矩, Zernike 不变矩, 复合矩等。文献[11]推导出了六维不变矩,该特征向量对多种复合变换具有不变性。文献[12]将 Radon 和极性谐波变换(PHTS)相结合并在此基础上构造出 3 个新的不变矩,这 3 个不变矩对噪声具有很强的鲁棒性。文献[13]在 Hu 不变矩基础上运用快速图像匹配遍历算法,大大提高了图像匹配效率。模糊不变矩最早由 Flusser 和 Zitova 提出,他们把一种同时具有模糊和旋转的不变矩成功用于卫星图像检测^[14]。最近,许国栋等人将模糊不变矩用于图像篡改区域的检测中,该方法在抗模糊处理中具有明显的优势^[15]。这些矩的一个共同问题是没有考虑光照和模糊两个因素同时影响的情况,在图像匹配过程中有一定局限性。

本文针对图像常同时出现光照变化和被卷积模糊干扰的现象,提出了一种新组合不变矩。该不变矩是在 Hu 不变矩的基础上进行重新组合,构造出 3 个既具有光照鲁棒性又具有模糊不变性的组合不变量,在保证较高的匹配正确率前提下匹配速度大大提高。

1 不变矩理论

对图像的平移、旋转、尺度等变换具有不变性的几何特征称为图像不变矩。

令图像 $f(x, y)$ 的 $(p+q)$ 阶几何矩,中心矩以及归一化中心矩分别定义如下:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x-x_0)^p (y-y_0)^q f(x, y) dx dy \quad (2)$$

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r} \quad (3)$$

其中, x_0, y_0 为图像几何中心坐标 $x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}}, y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}}$,

$$r = \frac{p+q+2}{2}, p, q = 0, 1, 2, \dots$$

二维矩不变量理论由 Hu 提出, Hu 不变矩是用二阶和三阶中心矩线性组合构造成的 7 个矩不变量,具有平移、旋转和比例不变性。这些不变量在目标识别,图像分析,文字识别等领域得到了广泛的应用。

2 新组合不变矩的构造

2.1 光照鲁棒的新重组 Hu 不变矩

值得注意的是, Hu 矩在离散情况下对平移和旋转具有不变性,对光照变化不具有不变性。为了克服光照变化的影响,对 Hu 矩进行重组构造得出一种新组合不变矩。

图像变换前的位置为 (i, j) , 灰度为 $f(i, j)$, 变换后位置为 (i', j') , 灰度为 $f'(i', j')$, 则有下列关系:

$$\begin{bmatrix} i' \\ j' \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} \quad \varepsilon > 0 \quad (4)$$

$$f'(i', j') = \lambda f(i, j) \quad \lambda > 0 \quad (5)$$

设变换前中心矩为 μ_{pq} , 变换后中心矩为 μ'_{pq} , 变换前重心坐标为 (\bar{i}, \bar{j}) , 变换后重心坐标为 (\bar{i}', \bar{j}') 。

$$\begin{aligned} \mu'_{pq} &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (i' - \bar{i}')^p (j' - \bar{j}')^q f'(i', j') = \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \lambda \varepsilon^{p+q} (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q f(i, j) = \lambda \varepsilon^{p+q} \mu_{pq} \quad (6) \end{aligned}$$

变换后归一化中心矩为:

$$\eta'_{pq} = \frac{\mu'_{pq}}{\mu'_{00}{}^r} = \frac{\lambda \varepsilon^{p+q} \mu_{pq}}{(\lambda \mu_{00})^r} = \frac{\varepsilon^{p+q}}{\lambda^{\frac{r}{2}}} \times \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r} = \left(\frac{\varepsilon^2}{\lambda} \right)^{\frac{p+q}{2}} \eta_{pq} = Q^{\frac{p+q}{2}} \eta_{pq} \quad (7)$$

其中: $r = \frac{p+q+2}{2}, Q = \frac{\varepsilon^2}{\lambda}$

将式(7)代入归一化 Hu 矩公式,得到:

$$\varphi'_1 = Q\varphi_1, \varphi'_2 = Q^2\varphi_2, \varphi'_3 = Q^3\varphi_3, \varphi'_4 = Q^3\varphi_4,$$

$$\varphi'_5 = Q^6\varphi_5, \varphi'_6 = Q^4\varphi_6, \varphi'_7 = Q^6\varphi_7$$

式中: $\varphi_1, \dots, \varphi_7$ 和 $\varphi'_1, \dots, \varphi'_7$ 分别为变换前和变换后的 Hu 矩不变量。

将上式重新组合, 得:

$$\psi_1 = \frac{\sqrt{\varphi_2}}{\varphi_1}, \psi_2 = \frac{\varphi_4}{\varphi_3}, \psi_3 = \frac{\varphi_7}{\varphi_5},$$

$$\psi_4 = \frac{\varphi_3}{\varphi_2\varphi_1}, \psi_5 = \frac{\varphi_5}{\varphi_3\varphi_4}, \psi_6 = \frac{\varphi_6}{\varphi_4\varphi_1}$$

将变换后的上述新组合不变量记为 ψ'_1, \dots, ψ'_6 , 则有:

$$\psi'_1 = \frac{\sqrt{\varphi'_2}}{\varphi'_1} = \frac{\sqrt{Q^2\varphi_2}}{Q\varphi_1} = \frac{\sqrt{\varphi_2}}{\varphi_1} = \psi_1$$

同理可证: ψ'_2, \dots, ψ'_6 分别等于 ψ_2, \dots, ψ_6 。

2.2 抗模糊的新重组不变矩

由于成像传感器焦平面的敏感单元的数目是保持不变的, 当从远到近观察目标时, 假定焦距不变, 随着传感器每一敏感单元上接收的场景信息的面积越来越大, 目标的实际分辨率会变得越来越差, 图像会变得越来越模糊, 此过程的数学模型可以认为是原图像在高斯函数作用下的一种卷积变换。描述如下:

$$f'(x, y) = f(x, y) \otimes g(x, y) \quad (8)$$

其中, $g(x, y)$ 为二维高斯函数: $g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ 。

定理 1 高斯模糊后中心矩

$$\mu_{pq}^* = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q C_p^i C_q^j g_i g_j \mu_{p-i, q-j} \quad (9)$$

其中, $C_n^m = \binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}$

$$g_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{+\infty} x_\tau^i e^{-\frac{x_\tau^2}{2\sigma^2}} dx_\tau = \begin{cases} 0 & i \text{ is odd} \\ 1, 3, 5, \dots, (i-1)\sigma^i & i \text{ is even} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得: $g_1 = g_3 = g_5 = g_7 = \dots = 0, g_0 = 1, g_2 = \sigma^2, g_4 = 3\sigma^4, g_6 = 15\sigma^6, \dots$

由式(9)得 Hu 的第一个矩:

$$\varphi_1^* = \eta_{20}^* + \eta_{02}^* = \frac{\mu_{20}^* + \mu_{02}^*}{\mu_{00}^2} = \frac{\mu_{20} + \mu_{02} + 2\sigma^2\mu_{00}}{\mu_{00}^2} = \varphi_1 + \frac{2\sigma^2}{\mu_{00}}$$

这说明 Hu 的第一个不变矩发生了改变, 增加了 $2\sigma^2/\mu_{00}$ 。

同理可得 Hu 的后六个矩 $\varphi_2, \dots, \varphi_7$, 模糊后 $\varphi_2^*, \dots, \varphi_7^*$ 保持不变。

$$\varphi_2 = \varphi_2^* = (\eta_{20} + \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

$$\varphi_3 = \varphi_3^* = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$\varphi_4 = \varphi_4^* = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2$$

$$\varphi_5 = \varphi_5^* = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) [3(\eta_{30} - \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

$$\varphi_6 = \varphi_6^* = (\eta_{20} - \eta_{02}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21})$$

$$\varphi_7 = \varphi_7^* = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2]$$

新组合的不变矩有:

$$\psi_2^* = \frac{\varphi_4^*}{\varphi_3^*} = \frac{\varphi_4}{\varphi_3} = \psi_2,$$

$$\psi_3^* = \frac{\varphi_7^*}{\varphi_5^*} = \frac{\varphi_7}{\varphi_5} = \psi_3,$$

$$\psi_5^* = \frac{\varphi_5^*}{\varphi_3^* \varphi_4^*} = \frac{\varphi_5}{\varphi_3 \varphi_4} = \psi_5$$

因此, 新组合的不变矩 ψ_2, ψ_3, ψ_5 是具有光照鲁棒和抗模糊的不变矩, 分别记为 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ 。

2.3 相似性度量函数

由于不变矩的变化范围比较大, 为了便于比较, 可用取对数的方法进行矩特征值变化范围的压缩, 同时考虑到不变矩有可能出现负值的情况, 因此, 在取对数之前先取绝对值, 对上述 3 个新组合的不变矩按如下方式处理:

$$\zeta'_k = \lg|\zeta_k| \quad k=1, 2, 3$$

采用如下式中完成相似度匹配:

$$C_k = \frac{\sum_{x \in R} (\zeta_k(x) \times \zeta'_k(x))}{[\sum_{x \in R} (\zeta_k(x))^2 \times (\zeta'_k(x))^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\bar{C}_k = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 C_k \quad (k=1, 2, 3)$$

其中, R 为角点邻域范围。

3 实验

本实验分 2 部分进行, 第 1 部分实验验证本文提出的新组合不变矩的光照鲁棒性和抗模糊性, 第 2 部分实验用新组合的不变矩作为特征描述子对受不同程度的模糊噪声和光照变化影响的图像完成特征匹配。第 2 部分将本文方法分别与文献[10]和 SIFT 算法作比较。其中 SIFT 算法被认为是经典的特征匹配算法, 其对图像的亮度变化, 模糊噪声具有良好的不变性。

3.1 新组合不变矩性能验证实验

为了验证新组合不变矩的光照鲁棒性和抗模糊性, 分别将取不同系数(称为模糊卷积系数)的高斯

核函数与原始图像作卷积运算,如式(8)所示,得到不同模糊程度的图像;取光调系数(称为曝光不足系数)大于1,将原始图像的亮度映射为更低值(灰暗)输出,获得不同暗度的曝光不足图像。为了保证研究的实际意义和价值,也即保证受影响后的图像具有最低限度的可识别性,实验中加入的模糊卷

积系数和曝光不足系数最大值上限是保证图像的可识别性。图1中最左边的为原始图,第1行(a)~(d)分别为加入不同程度的模糊噪声图片,第2行中的(a)~(d)分别为不同程度的曝光不足渐暗图片,第3行中的(a)~(b)为同时伴有不同程度的模糊和曝光不足图片。

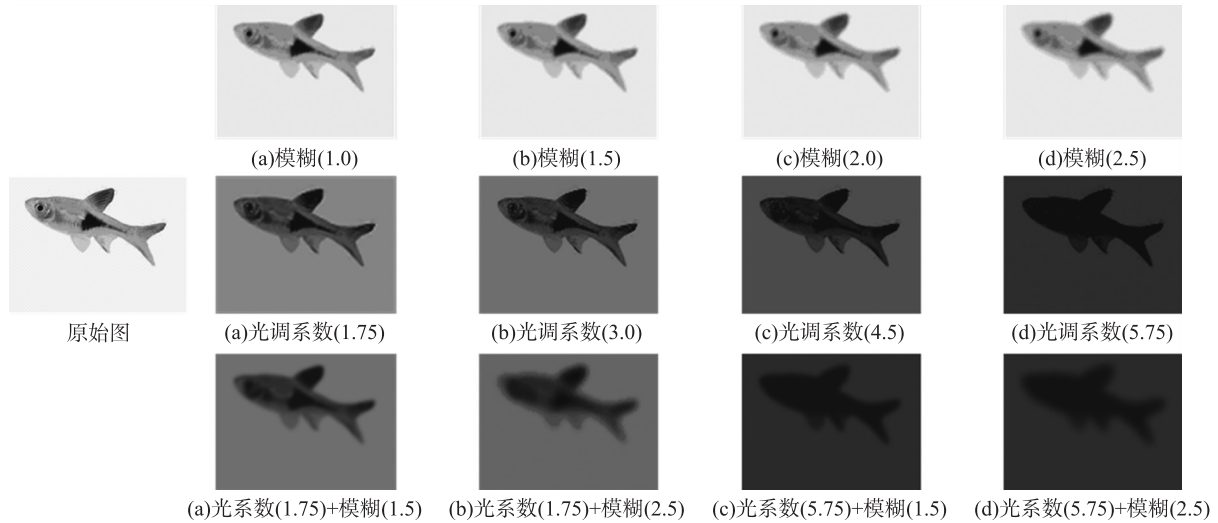


图 1 受不同程度模糊噪声干扰和曝光不足图

表 1 给出了 3 个新组合矩在不同情况下的计算值。从表 1 数据可知,不论图像是单独受模糊噪声干扰或是曝光不足还是同时受两者共同影响,3 个新组合矩($\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$)的值与原始理想图计算的值相比变化很微小,相对误差为 10^{-6} 级。由此可见该新组合的不变矩具有很强的光照鲁棒性和抗模糊性。

表 1 不同程度模糊噪声和曝光不足时 3 个新组合矩的值

图	ζ_1	ζ_2	ζ_3
原图	0.953261	0.0678106	0.999750
模糊系数(1.0)	0.953261	0.0678106	0.999750
模糊系数(1.5)	0.953261	0.0678106	0.999751
模糊系数(2.0)	0.953261	0.0678105	0.999751
模糊系数(2.5)	0.953262	0.0678105	0.999751
光调系数(1.75)	0.953261	0.0678106	0.999750
光调系数(3.0)	0.953261	0.0678106	0.999750
光调系数(4.5)	0.953261	0.0678105	0.999750
光调系数(5.75)	0.953260	0.0678105	0.999751
光调系数(1.75)+模糊系数(1.5)	0.953261	0.0678106	0.999750
光调系数(1.75)+模糊系数(2.5)	0.953261	0.0678106	0.999750
光调系数(5.75)+模糊系数(1.5)	0.953260	0.0678105	0.999751
光调系数(5.75)+模糊系数(2.5)	0.953260	0.0678104	0.999752

3.2 新组合不变矩匹配实验

本部分是完成原始图分别与受不同模糊程度的

噪声干扰(系数分别为 1.5, 3.0, 4.5, 5.0)、曝光不足(光调系数分别为 1.5, 2.5, 3.0, 3.5)以及受上述两种因素共同干扰(模糊 5.0 时光调系数分别为 1.5, 2.5, 3.0, 3.5, 光调 3.5 时模糊系数分别为 1.5, 3.0, 4.5, 5.0)图之间的匹配。为了保证在相同条件下验证各匹配算法的性能,实验中所有图像都先使用经典的 Harris 角点检测算法提取特征点,再分别采用本文方法、文献[10]以及 SIFT 算法完成特征点匹配。本文的实验环境:CPU: Celeron(R) Dual-Core, 主频: 2.00 GHz, 内存: 2GB, 操作系统: WindowXP2002, 开发环境: Matlab 7.0。所采用的实验测试图取自牛津大学图片库,如图 2 所示。第 1 行中(b)~(e)为其对应原图(第 1 行的(a)图)受不同程度模糊噪声干扰的图,第 2 行中(b)~(e)为其对应原图(第 2 行的(a)图)不同程度的曝光不足图,第 3 行中(b)~(e)为加入模糊系数为 5.0(第 3 行的(a)图)时再加入不同曝光程度的图,第 4 行中(b)~(e)为光调系数为 3.5(第 4 行的(a)图)时再加入不同程度模糊噪声图。

实验基于相同的匹配原理分多种情况进行,鉴于篇幅下面只给出本文方法的部分匹配效果图,如图 3 所示。为了表达简洁,将原图与模糊 5.0 的匹配效果记为情况 1(图 3(a)),原图与曝光不足 3.5 的匹配效果记为情况 2(图 3(b)),原始图与同时受模糊 4.5 和曝光不足 3.0 匹配效果

记为情况 3(图 3(c)),原始图与同时受模糊 5.0 和曝光不足 3.5 匹配效果记为情况 4(图 3(d))。表 2 给出了用本文方法对上述四种情况获得的反映匹配性能的具体参数值。其中正确匹配率是用来衡量匹配的效果的指标参数,是正确匹配的对数与总匹配对数的比值。

表 2 不同程度模糊噪声和曝光不足图像匹配参数值

情况	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
总匹配对数	23	52	35	27
正确匹配对数	23	51	34	26
正确匹配率/%	100	98.08	97.14	96.30

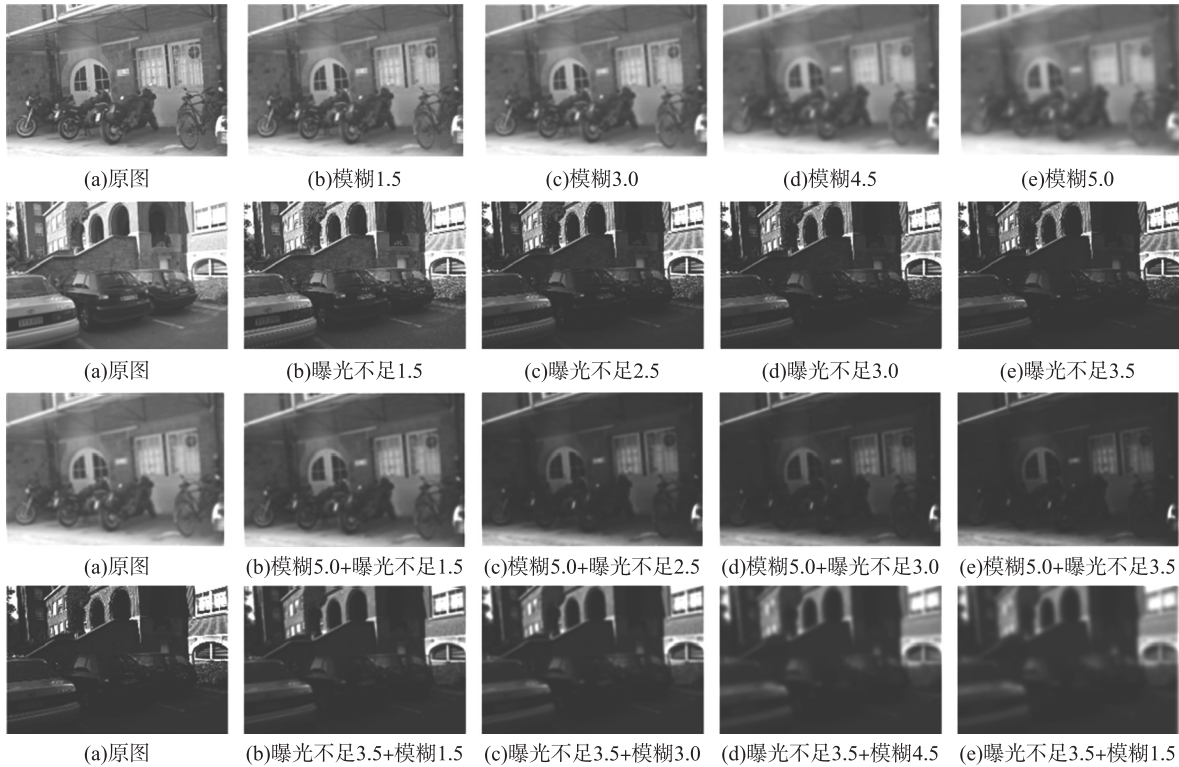


图 2 原始图与受不同程度模糊噪声干扰和曝光不足图

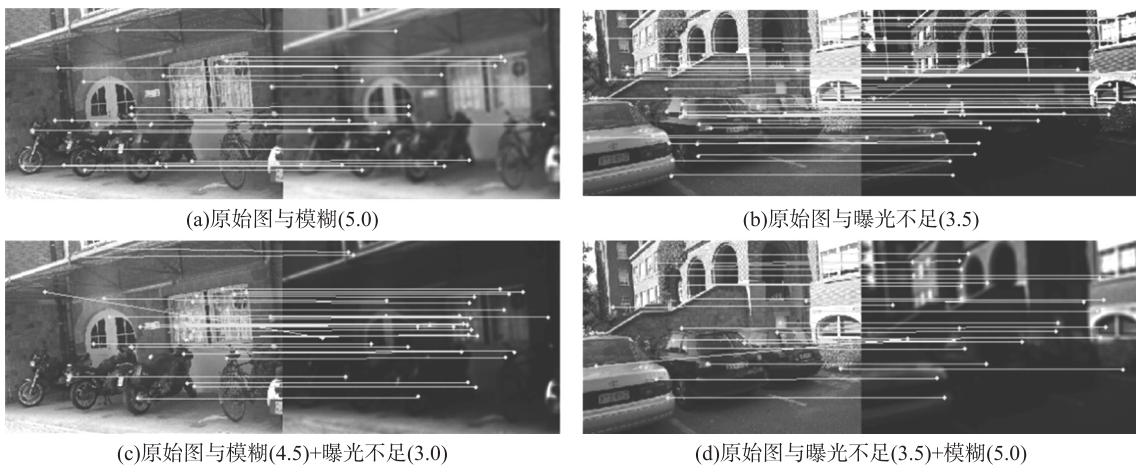


图 3 原始图与受模糊噪声干扰和曝光不足匹配效果图(本文方法)

图 4 给出了本文方法、文献[10]以及 SIFT 方法在不同情况下的正确匹配率比较。从图 4 中可以看出本文方法的正确匹配率要比 SIFT、文献[10]两种方法都高,尤其随着图像同时受光照变化和模糊影响程度增大时保持了较好的稳定性,正确匹配率在 96% 以上。由于 SIFT 和文献[10]分别是基于梯度和邻域灰度的算法,在图像很暗的情况下,梯度和灰度信息丢失严重,而且求取梯度的困难加大,导致匹配精度急剧下降。

图 5 列出了在不同情况下采用本文方法、文献[10]以及 SIFT 方法完成特征点匹配所需的 CPU 运行时间,具体是指每种方法从生成特征描述子到完成特征点相关匹配的一次完整运算过程所消耗的 CPU 时间。

从图 5 看出本文方法的所耗时间是 SIFT 算法的几十分之一、是文献[10]的几分之一。这主要是由于本文算法是基于低维的特征描述子,仅采用三个新组合不变矩,因此大大减少了匹配运算时间;而文献[10]和 SIFT 分别是 32 维,128 维的高维运算,匹配运算量都相当大,非常耗时。以上实验表明本文方法能很好地克服图像由于受模糊噪声和曝光不足影响而导致无法匹配的困难,在确保取得较高匹配精度的前提下,匹配速度大大提高。

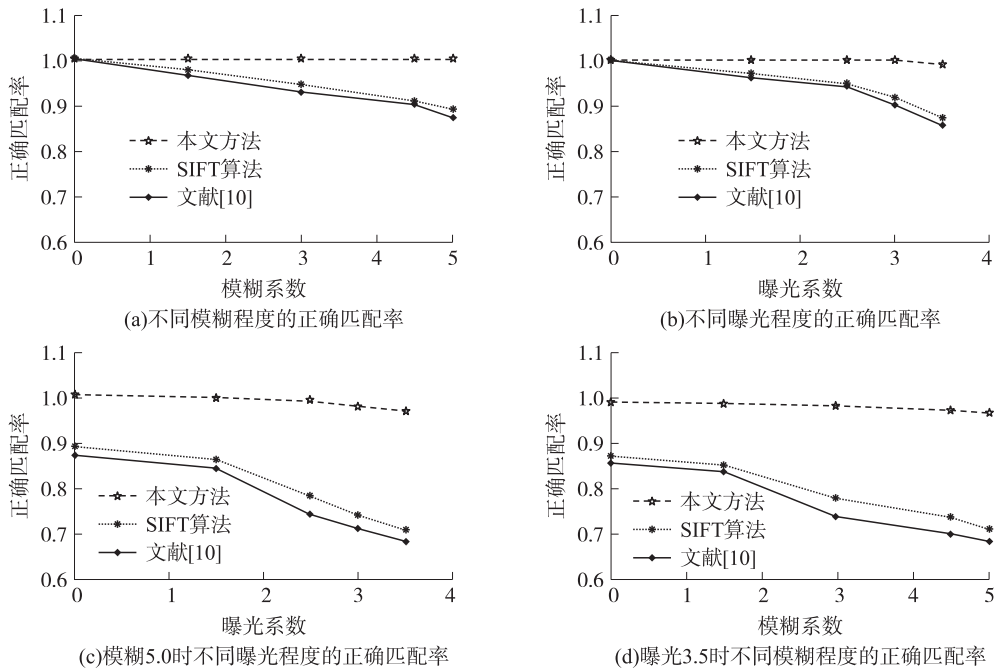


图 4 本文方法,SIFT 方法,文献[10]的方法在不同情况下的正确匹配率比较图

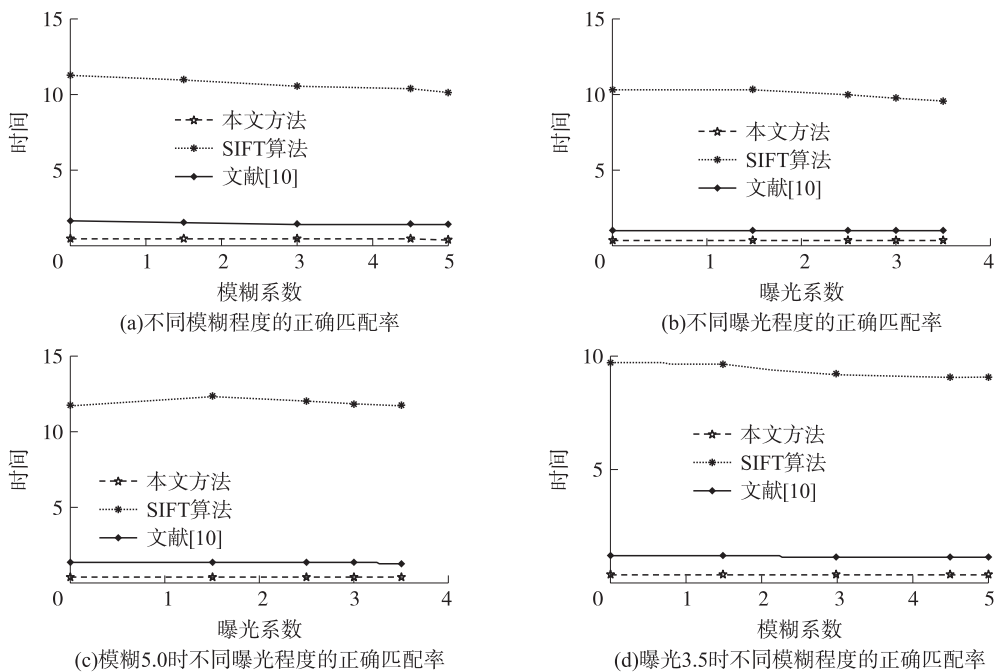


图 5 本文方法,SIFT 方法,文献[10]方法在不同情况下匹配时间比较图

4 结论

本文提出的新组合不变矩直接利用图像的灰度信息描述图像不变性特征。仿真实验表明,当图像的亮度发生变化且受模糊噪声干扰时,这种组合不

变矩仍然保持较好的稳定性,克服了光照和模糊对图像匹配所产生的不良影响。与文献[10]和 SIFT 两特征匹配方法相比,本文方法的抗模糊和光照变化性能更强,正确匹配率及匹配效率更高。但本文图像匹配算法的执行依赖于提取角点信息的准确

性,另外,本文方法解决亮度的非线性变化还存在一定的困难。考虑选用可靠的图像特征提取算法以及能够适应多种类型光照变化是下一步研究工作的方向。

参考文献:

- [1] Martin H, Christian Z, Michael W. A Fast Stereo Matching Algorithm Suitable for Embedded Real-Time System[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(11): 1180-1202.
- [2] 刘毅飞,张旭明,丁明跃. 归一化互相关灰度图像匹配的多核信号处理器实现[J]. 计算机应用, 2011, 31(12): 6-10.
- [3] Zou Y B, Dong F M, Lei B J, et al. Image Thresholding Based on Template Matching with Arctangent Hausdorff Distance Measure [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 600-609.
- [4] 刘明烁,吴铁军. 一种基于关联规则的图像特征点匹配算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12): 1737-1741.
- [5] Cao Y P, McDonald J. Improved Feature Extraction and Matching in Urban Environments Based on 3D Viewpoint Normalization [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2012, 116(1): 86-101.
- [6] Kouzani A Z, He F, Sammut K. Towards Invariant Face Recognition [J]. Information Sciences, 2000, 123(1-2): 75-101.
- [7] 李琳辉,赵兵,张明恒,等. 一种用于智能车环境探测的立体视觉传感器[J]. 传感技术学报, 2010, 23(9): 1247-1251.
- [8] 胡华. 改进的自商图算法[J]. 计算机工程, 2012, 4(38): 179-181.
- [9] 凌志刚,梁彦,潘泉,等. 一种鲁棒的红外与可见光多级景象匹配算法[J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1185-1194.
- [10] 唐永鹤,卢焕章,胡谋法. 基于 SCCH 特征描述子的图像匹配算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2152-2157.
- [11] Wu G, Wu C F, Hou Q Y. Target Location Method Based on Invariable Moment Feature Matching[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 460-466.
- [12] Miao Q G, Liu J, Li W S, et al. There Novel Invariant Moments Based on Radon and Polar Harmonic Transform [J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1044-1048.
- [13] 张儒良,席泓,王林. 一种基于 Hu 不变矩的匹配演化算法[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(5): 11-15.
- [14] Flusser J, Suk T, Saic S. Recognition of Blurred Images by the Method of Moments [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(3): 533-538.
- [15] 许国栋,李峰,熊兵,等. 基于模糊不变矩的复制粘贴伪造检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(20): 211-215.



刘欢(1981-),女,江西吉安人,博士研究生,讲师,主要从事机器视觉、图形图像处理、模式识别等方面的研究, liuhuan816618@163.com;



郝矿荣(1964-),女,河北石家庄人,博士后,教授,博士生导师,从事机器视觉、模式识别、智能机器人、智能控制、数字化纺织等研究, krhao@dhu.edu.cn;



丁永生(1967-),男,安徽怀宁人,博士研究生,教授,博士生导师,从事智能系统、网络智能、物联网、智能机器人、生物信息学、数字化纺织等研究。