

目标不变矩的稳定性研究

张天序, 刘进

(华中科技大学 图像识别及人工智能研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:研究了在实际应用中影响目标不变矩稳定性的各种因素, 包括高斯模糊、有限观测区域和离散化处理等. 分析了在这些因素影响下不变矩的变化规律和误差. 并对离散条件下不变矩的误差进行了分析. 实验证明得出的具有模糊不变的不变矩, 能对经过旋转比例变换且模糊的物体进行准确识别. 这些研究和分析为不变矩在实际成像识别系统中正确有效地应用提供重要的理论和实验依据.

关键词:目标识别; 图像处理; 不变矩; 稳定性

中图分类号:TP75 **文献标识码:**A

INVESTIGATION ON THE STABILITY OF OBJECT MOMENT INVARIANTS

ZHANG Yan-Xu, LIU Jing

(Institute for Pattern Recognition and A. I., State Key Laboratory of Image Processing and Intelligent Control,
HuaZhong University of Science and Technology, WuHan 430074, China)

Abstract: Several important factors, including Gaussian blurring, finite imaging region, and discrete computation, were considered to study the stability of moment invariants in practical application. The effect and rules of each factor to the moment invariants were investigated. The stability of moment invariant on the discrete data case was analyzed. The experiments show that it is possible to recognize the blurred and rotated images accurately by the suggested invariants. All these researches will provide important theoretical and experimental foundations for practical imaging recognition systems.

Key words: object recognition; image processing; moment invariants; stability

引言

由于不变矩方法^[1]能构造出旋转、平移、比例不变量而形成一组重要的反映目标形状的特征集, 这种方法被广泛应用于文字识别^[2]、目标识别^[3]、场景匹配与图像配准^[4], 等领域. 我们研究了不变矩的一般构造规律, 并导出了一系列高阶不变矩形式^[5], 为进一步推广不变矩的应用打下了基础. 文献^[6]讨论了计算不变矩时的信息损失、信息冗余及噪声等问题, 文献^[3]对各类不变矩应用于模式识别进行了研究.

由于成像系统散焦、大气湍流、图像去噪等因素的影响, 实际接收或处理的目标图像往往比较

模糊. 本文研究了在图像被卷积模糊的情况下不变矩的变化规律. 此外, 观察到的远距离目标往往是尺度较大且模糊的离散像素点阵, 因此有必要针对实际中遇到的不利因素对不变矩产生的影响加以分析.

1 高斯点扩展函数作用下的目标不变矩

1.1 积分区域无限的目标不变矩

原图像 $f(x, y)$ 在高斯点扩展函数($g(x, y)$)作用下的一种卷积变换定义如下

$f(x, y) \otimes g(x, y)$ 其中 $g(x, y)$ 为二维高斯函数;

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

1.1.1 高斯模糊后的中心矩

高斯模糊后卷积变换后中心矩变为:

$$u_{pq}^* = \iint_{R^2} (x-x_0)^p (y-y_0)^q [f(x,y) \otimes g(x,y)] dx dy$$

$$= \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q C_p^i C_q^j g_i g_j u_{p-i, q-j} \quad (2)$$

其中 $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$,

$$g_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} x^i e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx,$$

$$= \begin{cases} 0 & i \text{ 为奇数} \\ 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (i-1) \sigma^i & i \text{ 为偶数} \end{cases}$$

从式(2)可看出图像模糊后其中心矩增加了相隔偶数阶的低阶成分的线性组合,一般会发生变化.利用式(2)可计算出模糊后各阶中心矩,现总结如下:

$$\begin{cases} u_{20}^* = u_{20} + \sigma^2 u_{00} \\ u_{02}^* = u_{02} + \sigma^2 u_{00} \\ u_{11}^* = u_{11} \\ u_{30}^* = u_{30} + 3\sigma^2 u_{10} = u_{30} \\ u_{12}^* = u_{12} + \sigma^2 u_{10} = u_{12} \\ u_{03}^* = u_{03} + 3\sigma^2 u_{01} = u_{03} \\ u_{21}^* = u_{21} + \sigma^2 u_{01} = u_{21} \\ u_{40}^* = u_{40} + 6\sigma^2 u_{20} + 3\sigma^4 u_{00} \\ u_{04}^* = u_{04} + 6\sigma^2 u_{02} + 3\sigma^4 u_{00} \\ u_{31}^* = u_{31} + 3\sigma^2 u_{11} \\ u_{13}^* = u_{13} + 3\sigma^2 u_{11} \\ u_{22}^* = u_{22} + \sigma^2 u_{02} + \sigma^2 u_{20} + \sigma^4 u_{00} \end{cases} \quad (3)$$

1.1.2 各个不变矩变化情况

定理 1:高斯卷积后 Hu 的第一个不变矩 C_1 增加了 $2\sigma^2/u_{00}$. 其中 σ 是高斯模糊参数.

证明:将式(3)代入 Hu 的第一个不变矩 $C_1 = I_{02} + I_{20}$ 得:

$$C_1^* = I_{20}^* + I_{02}^* = \frac{u_{20}^* + u_{02}^*}{u_{00}^2}$$

$$= \frac{u_{20} + u_{02} + 2\sigma^2 u_{00}}{u_{00}^2} = C_1 + \frac{2\sigma^2}{u_{00}} \quad (4)$$

定理 2:在高斯模糊函数作用下, Hu 的其余六个不变矩 C_2-C_7 以及我们新构造的两个 4 阶不变矩 C_8, C_9 保持恒定.

证明:观察 Hu 的后 6 个表达式 C_2 至 C_7 以及我们新构造出的两个 4 阶不变矩^[15]:

$$\begin{cases} C_1 = I_{20} + I_{02} \\ C_2 = (I_{20} - I_{02})^2 + 4I_{11}^2 \\ C_3 = (I_{30} - 3I_{12})^2 + (3I_{21} - I_{03})^2 \\ C_4 = (I_{30} + I_{12})^2 + (I_{21} + I_{03})^2 \\ C_5 = (I_{30} - 3I_{12})(I_{30} + I_{12}) [(I_{30} + I_{12})^2 - 3(I_{03} + I_{21})^2] + (3I_{21} - I_{03})(I_{03} + I_{21}) [3(I_{30} + I_{12})^2 - (I_{03} + I_{21})^2] \\ C_6 = (I_{20} - I_{02}) [(I_{30} + I_{12})^2 - (I_{21} + I_{03})^2] + 4I_{11}(I_{30} + I_{12})(I_{03} + I_{21}) \\ C_7 = (3I_{21} - I_{03})(I_{30} + I_{12}) [(I_{30} + I_{12})^2 - 3(I_{03} + I_{21})^2] - (I_{30} - 3I_{12})(I_{03} + I_{21}) [3(I_{30} + I_{12})^2 - (I_{03} + I_{21})^2] \\ C_8 = (I_{04} + I_{40} - 6I_{22})^2 + 16(I_{31} - I_{13})^2 \\ C_9 = (I_{04} + I_{40} - 6I_{22}) [(I_{20} - I_{02})^2 - 4I_{11}^2] + 16I_{11}(I_{31} - I_{13})(I_{20} - I_{02}), \end{cases} \quad (5)$$

会发现其中有很多重复子式,3 阶以下不变矩都由 $I_{30} + I_{12}, I_{03} + I_{21}, I_{20} - I_{02}, I_{11}, I_{30} - 3I_{12}$ 和 $3I_{21} - I_{03}$ 组成,4 阶不变矩新增两个子式: $I_{04} + I_{40} - 6I_{22}$ 和 $I_{31} - I_{13}$. 不变矩 C_2, \dots, C_9 中都只包含了这些子式. 再将式(3)逐个带入各子式可得到模糊后这些子式的变化情况,如:

$$I_{20}^* - I_{02}^* = \frac{u_{20}^* - u_{02}^*}{u_{00}^2}$$

$$= \frac{(u_{20} + \sigma^2 u_{00}) - (u_{02} + \sigma^2 u_{00})}{u_{00}^2}$$

$$= \frac{u_{20} - u_{02}}{u_{00}^2} = I_{20} - I_{02} \text{ 保持不变}$$

我们将上面列出的 4 阶以下共 8 个子式都进行了计算发现一个重要事实:图像模糊后,所有子式都保持不变.这意味着由它们组成的不变矩集 C_2-C_9 也都保持不变.定理得证.

所以理想条件下目标发生模糊时,包含各阶子式的不变矩 C_2-C_9 仍能保持不变.而不包含各阶子式的 C_1 就发生了改变.

1.2 积分区域有限的目标不变矩

由于实际应用中的限制,矩的积分区域不可能无穷大,往往只局限于可观察到的或检测到的有限区域 SCREEN_D. 由于 SCREEN_D 区域的随意性,再加上成像系统的高斯点扩展函数对图像各部分的模糊迭加和散布作用,SCREEN_D 窗口内往往还迭加了背景模糊后传播进窗口内的部分信息,SCREEN_D 内的目标区域信息也可能被散布到有

限的窗口区域外而丢失. 因此在高斯模糊函数卷积的作用下, 当矩积分区域有限时, 矩不变量不守恒.

2 离散条件下不变矩的误差分析

实际应用中的图像都是以离散数字形式存放和处理的, 中心矩写成离散形式为:

$$U_{pq} = \sum_x \sum_y (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) \Delta x \Delta y \quad \text{其中 } x, y \text{ 为离散整数.} \quad (6)$$

由于离散图像分辨率有限, 仅在整数坐标处才有精确值, 计算所得的不变矩并不是随原图像的几何变换恒定不变, 而有一定误差. 当图像分辨率无穷大时, 式(6)中 $\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0$ 的极限值才是精确的 u_{pq} . 以像素为单位, 取积分步长 $\Delta x = 1, \Delta y = 1$, 当目标物体比例很小时, 比如 5×3 大小的目标, 这种积分步长就相对很大了, 从而会造成各个矩和不变矩的误差.

3 实验结果

3.1 积分区域很大条件下的实验结果:

图1中第一幅图是飞机原图像, 往后依次的比例为 0.5, 0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125. 本实验将飞机原图逐级进行高斯模糊和 1/2 采样得到 6 幅飞机图像不变矩 $C_1 - C_6$ 的曲线图. 如图 2. $C_1 - C_6$ 的计算式见公式(5). 图 2 中坐标轴上水平分布的六格

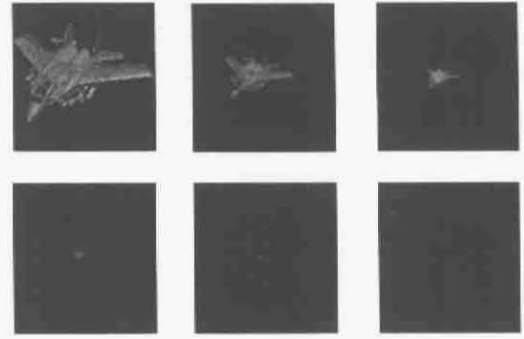


图1 一幅 150×150 大小的飞机图像比例逐级降低(尺度逐级增大)并模糊
Fig.1 A group of aircraft images (150×150), size gradually decreases and becomes blurring

依次代表比例为 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125 六幅图像. 图中水平线是比例为 1 时的不变矩值.

从这一组不变矩尺度曲线可以看出除了 C_1 外其余各不变矩 $C_2 - C_6$ 都能够在很小尺寸的目标模糊图像情况下仍保持相当稳定. C_1 则随图像模糊和缩小迅速增大.

3.2 识别旋转模糊的物体

本实验将根据图 3(a) 中的模板对图 3(b) 中检测到的旋转模糊物体进行识别. 采用了前面得到的 8 个兼具有模糊不变特性的不变矩 C_2, \dots, C_9 经

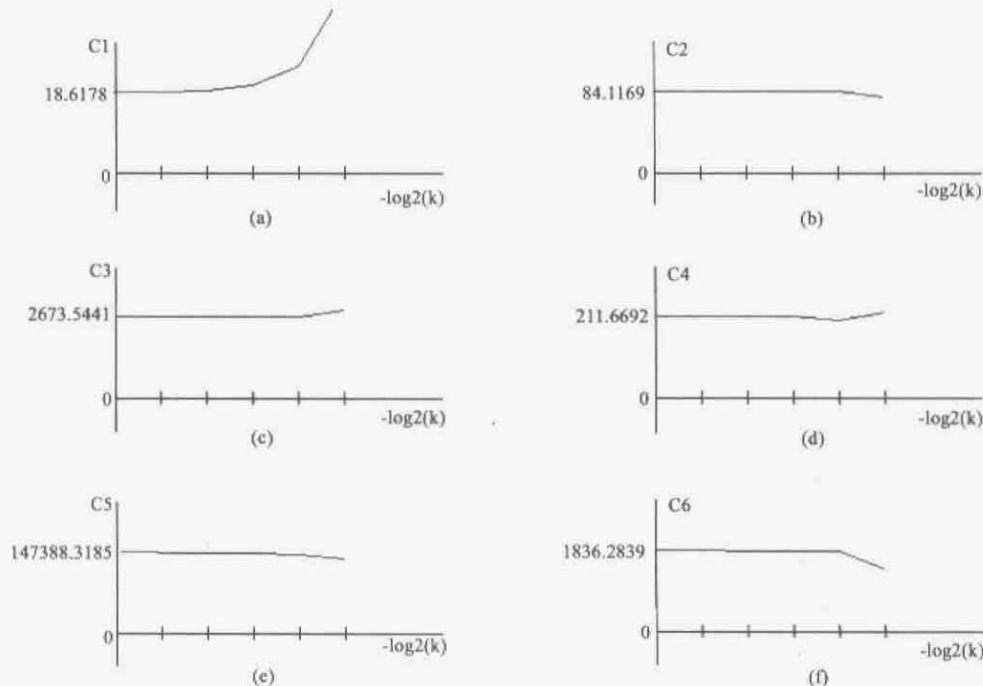


图2 积分区域很大条件下各个不变矩的尺度变化曲线
Fig.2 Curves of scale variation of invariants under very large integral region conditions

表 1 待识别的旋转模糊物体和模板的不变矩
Table 1 Moment invariants of the blurred rotational objects and the templates

| $\times 10^{-4}$ | C'_2 | C'_3 | C'_4 | C'_5 | C'_6 | C'_7 | C'_8 | C'_9 |
|------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 图 3.(a) | 47.8474 | 141.1097 | 73.4281 | 83.3506 | -57.9352 | -79.3081 | 163.6817 | -79.3472 |
| 图 3.(b) | 50.3668 | 143.0995 | 74.39502 | 84.9036 | -60.9531 | -80.8828 | 166.1236 | -78.7547 |
| 2 图 3.(a) | 77.9306 | 100.1901 | 63.3092 | 69.2839 | 64.0336 | -63.3739 | 173.7815 | 115.9888 |
| 图 3.(b) | 77.3934 | 96.2911 | 59.7012 | 65.1108 | 60.4290 | -61.2660 | 169.1724 | 114.0160 |
| 3 图 3.(a) | 69.1369 | 202.3008 | 104.1412 | 122.8092 | 93.5254 | -85.7900 | 279.8661 | 138.3047 |
| 图 3.(b) | 66.4622 | 199.8464 | 99.4797 | 118.2163 | 89.2360 | -86.1013 | 278.3136 | 134.8050 |
| 4 图 3.(a) | 78.1634 | 140.3792 | 31.7251 | 44.9366 | 35.0881 | 40.9548 | 210.8760 | 121.7225 |
| 图 3.(b) | 79.8016 | 142.2358 | 31.7490 | 45.2324 | 35.3869 | 40.7505 | 211.1912 | 123.5178 |
| 5 图 3.(a) | 59.4569 | 62.4597 | 29.7197 | -35.7155 | -33.1490 | 26.0928 | 88.8306 | 70.0342 |
| 图 3.(b) | 60.9398 | 63.3953 | 30.4147 | -36.5181 | -33.4431 | 24.6229 | 89.6381 | 71.5451 |
| 6 图 3.(a) | 61.3502 | 23.0256 | 10.9850 | 11.0857 | 14.8430 | 13.0761 | 81.8102 | 62.4638 |
| 图 3.(b) | 60.9120 | 23.0111 | 10.9846 | 9.9497 | 14.1056 | 13.1781 | 81.0471 | 61.9137 |

表 2 距离矩阵
Table 2 Distance matrix

| | | 图 3(a) | | | | | |
|--------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 图 3(b) | (1) | 2.7390 | 238.5212 | 300.1431 | 265.5334 | 252.0106 | 256.3274 |
| | (2) | 234.8571 | 9.4072 | 176.4939 | 126.5854 | 193.1547 | 169.7404 |
| | (3) | 293.9353 | 161.8589 | 9.4422 | 193.4634 | 339.3380 | 331.3869 |
| | (4) | 265.9830 | 128.3142 | 198.2619 | 3.1100 | 189.9459 | 194.4315 |
| | (5) | 249.1627 | 200.5472 | 345.1642 | 187.1882 | 3.0632 | 82.9586 |
| | (6) | 252.8469 | 179.9485 | 339.2560 | 193.3174 | 80.7523 | 1.7094 |

过如下数量级统一处理得到的 $\{C'_2, \dots, C'_9\}$ 作为特征向量进行识别: $C'_2 = C_2^{1/2}; C'_3 = C_3^{1/3}; C'_4 = C_4^{1/3}; C'_5 = [\text{sgn}(C_5)] C_5^{1/6}; C'_6 = [\text{sgn}(C_6)] C_6^{1/4}; C'_7 = [\text{sgn}(C_7)] C_7^{1/6}; C'_8 = C_8^{1/4}; C'_9 = [\text{sgn}(C_9)] C_9^{1/4}$

其中 $\text{shn}(x)$ 是符号函数

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

表 1 给出了各个模板(图 3(a))和旋转模糊物体(图 3(b))的不变矩特征向量 $\{C'_2, \dots, C'_9\}$. 我们采

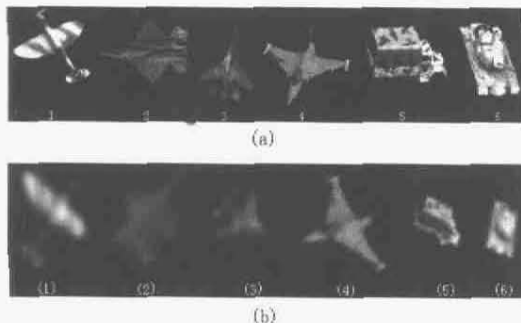


图 3 待识别的旋转模糊物体和匹配模板
Fig.3 Objects to be recognized and templates

用最短距离分类法对旋转模糊物体进行分类. 得到距离矩阵如表 2. 可见对角线上的距离值最小. 根据最短距离分类原则, 所有物体都能被正确的分类.

识别算法包括计算中心矩 u_{pq} , 计算不变矩和识别分类 3 个步骤, 除特别选取了兼具有模糊不变特性的不变矩 $C'_2 \sim C'_9$ 作为特征外, 未增加新的计算量. 表 3 给出了在 CPU 主频率 1GHz 的 PC 机上进行 6 次识别分别所需时间. (采用 Windows API 函数 'QueryPerformanceFrequency' and 'QueryPerformanceCounter' 进行计时.)

表 3 识别所需时间
Table 3 Time spend on recognition

| 图 3(b)中待识别物标号 | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 一次识别 | | | | | | |
| 总用时 (ms) | 1.4248 | 1.4717 | 1.5153 | 1.5924 | 1.4683 | 1.5019 |

4 结论

通过理论分析和实验结果得出以下结论:

(1) 在图像连续和积分区域无穷大条件下, 包含各阶式的不变 (下转第 204 页)

的消失并不是由于电声子相互作用所引起,并且在这些薄膜中观察到 E_2 模式的 FWHM 增加为 $11 - 15 \text{ cm}^{-1}$, 这标志着薄膜质量进一步变差,因此我们认为在 P 型 GaN 材料中,除载流子以外,薄膜质量同样会对 $A_1(\text{LO})$ 模式产生影响.

3 结论

对 SiC(0001) 衬底上异质外延的 GaN 和 GaN:Mg 进行 XRD、SEM 和拉曼散射光谱的研究发现,在未掺杂 GaN 和 GaN:Mg 薄膜中 E_2 模式均向频率低的方向发生漂移表明薄膜都处于张力应力状态之下,但是 Mg 的掺杂不仅使 XRDR 的半高宽增加、在样品表面出现裂纹而且造成 E_2 模式向频率高的方向漂移,禁戒模式 $A_1(\text{TO})$ 模式与 E_2 模式的强度之比也较掺杂前有所增加,因此我们认为 Mg 的掺杂会在样品中引入更多的缺陷和位错加剧薄膜的无序化程度,致使薄膜质量变差;其次因为 Mg 原子半径比 Ga 原子半径大,所以当 Mg 替代 Ga 以后会引发压力应力,从而使薄膜张力减小,最后通过计算说明对于 GaN:Mg 样品而言,除了载流子以外,薄膜质量同样也会对 $A_1(\text{LO})$ 模式产生影响.

REFERENCES

[1] Strite S, Morkoc H. GaN, AlN and InN: A review [J]. *J.*

Vac. Sci. Technol. B, 1992, **10**(4):1237—1266.

- [2] SUN Yi-Jun, LI Ai-Zhen, QI Ming. Preparation of single phase hexagonal GaN on GaAs (100) Substrate by MOCVD [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (孙一军, 李爱珍, 齐鸣, 立方 GaAs (100) 衬底上制备单相六方 GaN 薄膜, 半导体学报), 2001, **22**(3):313—316.
- [3] SUN Xiao-Ling, YANG Hui, LI Guo-Hua, et al. Study of optical characteristics of cubic GaN grown on GaAs(001) by MOCVD [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (孙小玲, 杨辉, 李国华等, GaAs(001) 衬底上 MOCVD 生长的立方相 GaN 外延薄膜的光学性质研究, 半导体学报), 1999, **20**(3):225—230.
- [4] David J S, Chandrasekhar D. Characterization of structural defects in wurtzite GaN grown on 6H SiC using plasma-enhanced molecular beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13):1830—1832.
- [5] Ponce F A, Krusor S. Microstructure of GaN epitaxy on SiC using AlN buffer layers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(3):410—412.
- [6] Chien F R, Ning X J, Stemmer S. Growth defects in GaN films on 6H-SiC substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(19):2678—2680.
- [7] Melnik Yu V, Vassilevski K V, Nikitina I P. Physical properties of bulk GaN crystals grown by HVPE [J]. *MRS Internet. Nitride Semicond. Res.*, 1997, **2**, 39.
- [8] Kozawa T, Kachi T, Kano H. Thermal stress in GaN epitaxial layers grown on sapphire substrates [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(9):4389—4392.
- [9] Kirillov D, Lee H, Harris J S. Raman scattering study of GaN films [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**:4085—4062.

(上接第 200 页)

矩 $C_2 - C_9$ 仍能保持不变. 而不包含各阶子式的 C_1 就发生了改变. 因此 $C_2 - C_9$ 是兼具有高斯模糊不变特性的不变矩. 这些不变矩可有效地对模糊且经过旋转比例变换的目标进行识别.

(2) 中心矩 $u_{pq}(p+q \geq 2)$ 增加了低阶中心矩的线性组合. 利用这些线性组合还可以推导各种不变矩的卷积模糊变化规律.

(3) 实际条件下, 图像的不变矩会受各方面因素的影响而发生变化. 矩积分区域有限会使不变矩值产生变化. 离散量化对不变矩造成的影响主要在分辨率变差情况下表现得比较明显.

REFERENCES

[1] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. *IRE Trans. IT*, 1962, **8**:179—187.

- [2] Flusser J, Suk T. Affine moment invariants: A new tool for character recognition [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1994, **15**:433—436.
- [3] Belkasim S O, Shridhar M, Ahmadi M. Pattern recognition with moment invariants: a comparative study and new results [J]. *Pattern Recognition*. 1991, **24**(12):1117—1138.
- [4] Wong R Y, Hall E L. Scene matching with invariant moments [J]. *Comput. Graphics Image Process*, 1978, **8**:16—24
- [5] LIU Jin, ZHANG Tian-Xu. An Investigation on the method for constructing the moment invariant [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural sciences edition)*. (刘进, 张天序, 不变矩构造方法的研究, 华中科技大学学报), 2003, **31**(3):115—118.
- [6] ABU-MOSTAFA Y S, PSALTIS D. Recognitive aspects of moment invariants. [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, **6**(6):698—706.