

Sluzek 矩不变量方法的改进

陈 佩,许晓鸣,张卫东,徐润生

(上海交通大学自动化研究所,上海 200030)

摘 要: 本文首先分析 Sluzek 方法的思想即:减小方差而同时尽可能不减小不同类之间的均值差;然后分析了该方法的不足之处,证明了存在改进的可能性;并且提出了改进方法,即把目标分割为 n 个矩等分圆环,分别计算其矩不变量,从中选取某几个量作为识别指标;最后通过例子证实了本文方法的改进效果.

关键词: 矩不变量; Sluzek 方法; 矩等分; 模式识别

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 10-0045-04

An Improvement to Sluzek's Moment Invariant Method

CHEN Pei, XU Xiao-ming, ZHANG Wei-dong, XU Run-sheng

(Automation Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, Sluzek's method is investigated. Its advantage lies in decreasing moments variance and in making full use of discriminating difference between two classes as possible. Its disadvantage is its inability of discriminating two similar classes whose differences lie in the middle. In this paper we will prove in a general form that there is much chance of improving this method, and present a new method. The prototype object is partitioned into n rings of equal moment, and the moment invariants corresponding to these circles are computed, from which some are selected as the descriptors of the objects. Finally, the improving effect of our method is verified by some examples.

Key words: moment invariant; Sluzek method; partitioning of equal moment; pattern recognition

1 引言

自从 Hu^[1]把矩不变量(moment invariant)方法用于 2D 模式识别以来,该方法已经广泛用于工业生产中,如机器人的工件识别、不合格产品的识别;另外一个广泛的应用是字符识别^[2]. 由于矩不变量具有平移、旋转、尺度不变性,以此为基础的识别方法具有很好的鲁棒性.

不过,在有噪声的环境中,该方法在识别相近目标时不是非常成功.为了解决上述存在的问题,Sluzek^[3]提出了一种非常巧妙的方法. Sluzek 的方法是用一个位于目标中心的圆把目标中心部分遮盖起来,计算其余部分的矩.由于这样能够获得局部区域的矩,该方法在某些情况下有较大的改进效果,在文[3]中的例子已经证实了这一点.

但是,Sluzek 的方法也有不足之处,即只有当差别位于边缘时才有改进作用,而对其它部分的差别不敏感,特别是当差别主要存在于中心部位时,基本上无能为力.为此,本文提出了另外一种改进方法,利用某些圆环部分的矩来识别目标.由于该方法的局部化性能优于 Sluzek 方法,因此,对于相近目标,识别效果也优于 Sluzek 方法.

本文首先回顾了矩不变量的定义和 Sluzek 的改进方法;然后,在分析了 Sluzek 方法不足之处的基础上,从理论上证明

了存在改进该方法的可能性,阐明了本文方法的来由及其合理性;最后通过比较该方法和其它方法(特别是 Sluzek 方法)的结果证实这一点.

2 矩不变量及 Sluzek 方法

2.1 矩和矩不变量

对于某一 2-D 函数 $f(x, y)$, n ($n \geq 0$) 阶几何矩 $m_{p, q}$ 的定义为:

$$m_{p, q} = \iint_R x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (1)$$

其中 $p + q = n$, R 是 $f(x, y)$ 的定义域.

同样, n 阶中心矩 $\mu_{p, q}$ 定义为:

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

$$x_0 = m_{10} / m_{00}, y_0 = m_{01} / m_{00} \quad (3)$$

(x_0, y_0) 相当于质心.

在文[1]中, Hu 根据代数不变量^[4]的性质证明了矩不变量的存在性,并且构造了 7 个矩不变量,它们具有平移、旋转、尺度不变性.其中两个 2 阶矩不变量是(其它的矩不变量是 3 阶矩):

$$I_1 = (\mu_{20} + \mu_{02}) / \mu_{00}^2 \quad (4)$$

$$I_2 = I(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 / \mu_{00}^4 \quad (5)$$

2.2 Sluzek 的改进方法

但是,在有噪声和目标相差不大的情况下,基于矩不变量的识别方法效果不是非常好.为了解决该困难,Sluzek 设计了一种非常巧妙的方法,即用一个位于目标中心的圆把目标中心部分遮盖起来(如图 1 所示),对其余部分求矩.由于这样得到局部区域的矩,该方法在某些情况下能够识别相近目标.如图 1 所示,为了识别 A、B 两个目标,不是直接对整个目标求矩不变量,而是如 C、D 和 E、F 所示,分别计算被某一个圆覆盖后部分图像的矩.在第 3 部分将说明该方法的合理性.

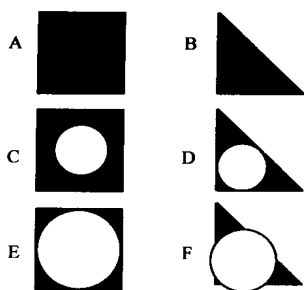


图 1 Sluzek 方法的示意图

3 本文方法及由来

在叙述本文的方法之前,首先分析 Sluzek 方法的不足之处.如前言中所讲的那样,Sluzek 方法只能对差别位于边缘的目标识别有改进作用,而对其它部分的差别不敏感,特别是当差别主要存在于中心部位时,基本上无能为力(这一点将在后面的例子中得到证实).如图 2 所示,A 是代表某一正常产品,而 B、C 和 D 分别是某一不合格产品.在 Sluzek 方法中,识别出 B、C 和 D 不合格的最佳圆如图 3 所示.

非常明显,在噪声环境中,利用 Sluzek 方法的识别效果从好到差依次为 D、C、B(这一点也能够从第 4 节的实验结果看出).其中,在识别 B 时,Sluzek 方法基本上没有改进效果.

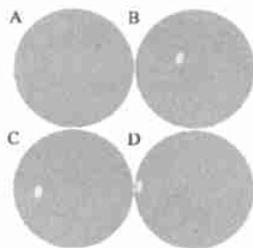


图 2 识别 A 与 B、C、D

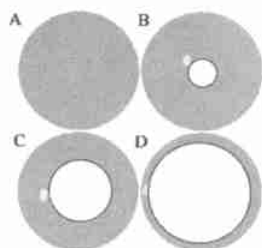


图 3 Sluzek 方法的最佳圆

3.1 提高识别率的可能性分析

在模式识别中一个常用的指标定义如下:

$$Q(I_x, R_i, R_j) = \frac{V(R_i, I_x) + V(R_j, I_x)}{|\bar{I}_x(R_i) - \bar{I}_x(R_j)|} \quad (6)$$

它代表不变量 I_x 识别类 R_i 和 R_j 的性能.对于类 R 和选择的不变量 I_x 来说, $\bar{I}_x(R)$ 代表参数 $I_x(R)$ 的期望值, $V(R, I_x)$ 代表它的方差. Q 越小说明不变量 I_x 区分 R_i 和 R_j 的性能越好.一般来说,选择的不变量应该具备满足两个特点:在同一类中

具有较小的方差,而在不同类之间却具有较大的均值差,即式(6)中的右边有较小的分子和较大的分母.为了有效地区别 R_i 和 R_j ,一般要求 $Q(I_x, R_i, R_j) < 1$.

Sluzek 的思想就是希望减小式(6)的分子.当 A、B 两个目标的差别不是均匀分布,而是集中位于某一局部 R 时,那么在整个区域 R 与在 R 上积分得到的矩不变量变化不大;但是,对于噪声来说,也就是式(6)中的分子,与区域 R 、 R 的面积接近正比例关系.可以证明,相对于性能指标 Q 来说,可以找到一个半径为 r 的圆,使得 Sluzek 的方法比通常的矩不变量方法好.为了更好地与本文提出的方法联系起来,这里证明一个更加一般的定理.

定义 1 矩等分 $C_n (n > 1)$: 对半径为 r 的圆 C 来说,关于矩 μ_{pq} 的 n 等分是与 C 同心的一个圆 C_1 和 $n-1$ 个圆环 $C_i (1 < i \leq n)$, 其中 C_i 满足下列条件:

$$\iint_{C_i} x^p y^q dx dy = \frac{1}{n} \iint_C x^p y^q dx dy \quad (7)$$

$$\text{定义 2 } Q_i: Q_i = Q(I_i, R_i, R_j) \quad (8)$$

其中 I_i 是相对于区域 C_i 的矩不变量.

定理 1 R_i 和 R_j 是两个能够被圆 C 覆盖的目标.对于 C 的任意矩等分 C_n , 存在 i 满足: $Q_i \leq Q$.

证明: 假设 $f(x, y)$ 是待识别的目标信号, $n(x, y)$ 是由于各种因素引入的 0 均值、 σ^2 方差噪声

$$I = \iint_C \phi_{pq}(x, y) [f(x, y) + n(x, y)] dx dy \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{I} &= E\{ \iint_C \phi_{pq}(x, y) [f(x, y) + n(x, y)] dx dy \} \\ &= \iint_C \phi_{pq}(x, y) f(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V(I) &= \sqrt{E(I - \bar{I})^2} = \sqrt{E\{ \iint_C \phi_{pq}(x, y) n(x, y) dx dy \}^2} \\ &= n \iint_C \phi_{pq}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (11)$$

同样可得对应于 C_i 的矩不变量 I_i 的均值 \bar{I}_i 和方差 $V(I_i)$:

$$I_i = \iint_{C_i} \phi_{pq}(x, y) [f(x, y) + n(x, y)] dx dy \quad (12)$$

$$\bar{I}_i = \iint_{C_i} \phi_{pq}(x, y) f(x, y) dx dy \quad (13)$$

$$V(I_i) = n \iint_{C_i} \phi_{pq}(x, y) dx dy \quad (14)$$

由定义 1、2 可以得到:

$$\bar{I}_i = \bar{I} \quad (15)$$

$$V(I_i) = \frac{1}{n} V(I) \quad (16)$$

$$\text{而 } Q_i = Q(I_i, R_i, R_j) = \frac{V(R_i, I_i) + V(R_j, I_i)}{|\bar{I}_i(R_i) - \bar{I}_i(R_j)|} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} |\bar{I}_i(R_i) - \bar{I}_i(R_j)| &= \left| \frac{1}{n} \{ \bar{I}_i(R_i) - \bar{I}_i(R_j) \} \right| \\ &\leq \frac{1}{n} |\bar{I}_i(R_i) - \bar{I}_i(R_j)| \end{aligned} \quad (18)$$

那么,必定存在 $l_k (1 \leq l_k \leq n)$ 满足:

$$|\bar{I}_i(R_i) - \bar{I}_i(R_j)| \geq \frac{1}{n} |\bar{I}_i(R_i) - \bar{I}_i(R_j)| \quad (19)$$

其中 $l = l_k$.

把式 (16)、(19) 代入式 (17) 得到

$$Q_l = \frac{1}{n} \frac{V(R_i, D) + V(R_j, D)}{|\bar{T}_l(R_i) - \bar{T}_l(R_j)|} \leq \frac{V(R_i, D) + V(R_j, D)}{|\bar{T}(R_i) - \bar{T}(R_j)|} = Q \quad (20)$$

证毕

定理 2 R_i 和 R_j 是两个能够被圆 C 覆盖的目标. 对于 C 的任意划分 C_n , 存在 i 满足: $Q_i \leq Q$.

引理 $2n$ 个正数 a_1, a_2, \dots, a_n 和 b_1, b_2, \dots, b_n , 则存在 $i (1 \leq i \leq n)$ 使下列式子成立:

$$\prod_{l=1}^n a_l / \prod_{l=1}^n b_l \leq \frac{a_i}{b_i} \quad (21)$$

很容易从多项式的性质证明该引理, 证明从略. 然后根据定理 1 的证明方法和上述引理也容易证明定理 2, 证明从略. 从定理 2 也就间接说明了 Sluzek 方法的合理性, 如前面所提到的一样, Sluzek 方法优于一般的矩不变量方法.

从该定理的思想出发, 可以发现 Sluzek 方法的不足之处: 只有当有用信息(差别)位于目标的边缘时, 才能充分利用. 否则, 如图 2、3 所示, 为了识别出 B、C、D 中的缺陷, 覆盖圆的半径不能选的太大(所能选取的最大圆如图 3 中所示). 这样, 在有噪声的情况下(如图 4), Sluzek 方法的效果不是很好. 非常明显, 如图 3 所示, 该方法虽然利用了有用的信息(即由于缺陷而形成的小斑); 但是在 B、C 中, 缺陷小斑的外围有很大一个区域, 在其上的矩积分对目标识别没有帮助, 但是可能引入非常大的噪声效果, 因为矩对噪声的敏感程度是, 离中心越远越敏感.

3.2 本文的方法

引言中提到的本文方法就是根据定理证明中的思想而来. 为了充分利用有用信息(目标之间的差别), 而同时有效地消除噪声的影响, 本文提出了另外一种改进方法, 利用某些圆环部分的中心矩来识别目标. 图 4 中的 4 个目标就是图 2 中的 4 个被噪声污染的目标. 图 5 是本文方法的示意图, 4 个目标被分割成矩等分 C_{10} . 这是在完成定理证明和分析了 Sluzek 方法的不足之处后对 Sluzek 方法的一种非常自然的改进方法.

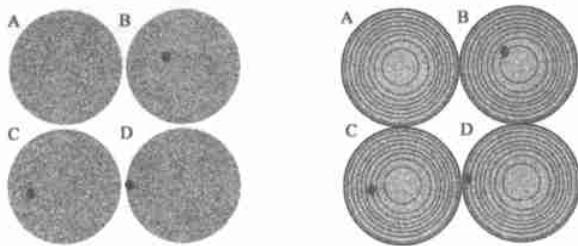


图 4 被噪声污染的 4 个目标 图 5 本文方法中的圆环分割

从图 4 中很容易看出, 为了尽可能地得到较小的 Q (意味着较大的分辨率), 识别出 B 中缺陷, 矩的积分区域应该选择第 2 个圆环, 而 C、D 分别对应第 4、9 个圆环. 这一点将由后面的实验结果验证. 由于这样能够得到任何部位的矩, 因此, 对任何相近目标, 都能够找到相应的矩不变量来区分它们.

另外, 从定理 1 的证明过程可以得到下列结果: 如果目标

之间的差别完全位于矩等分 C_n 的第 i 个圆环内部, 那么, 与通常方法相比, 本文方法能够提高 n 倍, 而 Sluzek 方法只能提高 $n/(n-i+1)$ 倍; 本文方法比 Sluzek 方法能够提高 $n-i+1$ 倍, 与差别所处的位置有关.

4 实验结果及与其它方法的比较

在产品检测中, 产品的缺陷一般只是局部性的, 也就是说它们是与正常产品非常相近, 并且在一般情况下, 不能够预测或者不能够完全预测缺陷会出现在哪个部位, 有可能出现在任何部位. 因此, 在这种情况下, 识别的指标量必须是: 能够识别细小的差别、与差别所处的位置无关、并且对噪声不敏感. 很明显, Sluzek 方法不能满足这些条件, 因为该方法的性能与缺陷的位置密切相关.

根据第 3 节的分析, 前面提出的把圆环部分的矩积分作为识别指标, 在识别非常相近的目标时(一个很常见的例子即不合格产品的识别), 其性能应该优于 Sluzek 方法. 下面就是以识别图 4 中的 A、B、C 和 D 为例子, 从正常产品 A 中识别出不合格产品 B、C、D.

在该例子中, 把目标划分为矩等分 C_{10} , 然后分别计算各个圆环部分的 Hu 矩 I_2 (式 (4)), 求得均值 \bar{T}_i 和方差 V_i , 再利用式 (6) 可得 $Q(A, B, I_i)$ 、 $Q(A, C, I_i)$ 和 $Q(A, D, I_i)$ (如表格 1, i 代表由内到外的第 i 个圆环). 表格 2 比较了本文方法、Sluzek 方法和通常矩方法的结果.

表 1 以各圆环部分的矩为指标得到的 Q

1.0e + 003 *			
	$Q(A, B, I_i)$	$Q(A, C, I_i)$	$Q(A, D, I_i)$
r_1	0.0029	0.0145	0.0169
r_2	0.0008	0.0281	0.0760
r_3	0.0533	0.0018	0.0189
r_4	0.0683	0.0005	0.0262
r_5	0.0489	0.0164	0.0371
r_6	0.0104	0.0102	0.0147
r_7	0.0205	0.0063	0.0245
r_8	0.0435	1.1044	0.0015
r_9	0.0343	0.0053	0.0006
r_{10}	0.0746	0.0100	0.0028

表 2 本文方法与 Sluzek 方法及通常矩方法的比较.

	$Q(A, B)$	$Q(A, C)$	$Q(A, D)$
本文方法	0.8	0.5	0.6
Sluzek	2.8	1.8	1.0
通常方法	2.9257	2.6935	2.4873

从表 2 可以看出, Sluzek 方法与通常的矩不变量方法相比, 当类之间的差别主要位于边缘, 有较大的改进效果, 如 $Q(A, D)$ 从 2.4873 提高到 1.0. (这一点也可以由文 [3] 中的结果证明, 因为该文中目标之间的差别也主要位于边缘部分.) 但是, 随着差别向目标中心靠近, 其改进效果越来越减不明显, 其中 $Q(A, C)$ 从 2.6935 提高到 1.8, 而对于 $Q(A, B)$ 来说, 基本上没有什么改进效果.

同样, 从表 2 可以看出, 与 Sluzek 方法相比, 本文方法在识别 B 或者 C 时的性能大大提高, 分别从 2.8 提高到 0.8, 1.8

到 0.5,也就是说,当差别位于目标中部时,本文方法比 Sluzek 方法有较大的改进;而 D 的识别率提高不多,从 1.0 提高到 0.6. 其中,Sluzek 方法在识别 B 或者 C 中的缺陷时,很难达到较高的准确率,因为 $Q(A, B)$ 和 $Q(A, C)$ 都大于 1. 然而,采用本文的方法就能够满足该条件.

5 结论

从前面的分析和例子可以看出,本文方法较 Sluzek 方法的局部化性能好,因此在区分相近目标时本文方法也优于 Sluzek 方法,特别是当目标之间的差别位于中间区域时.

参考文献:

- [1] Hu M. K. ,Visual pattern recognition by moment invariants [J]. IRE Transaction on Informtion Theory ,1962 ,8 :179 - 187.
- [2] Prokop R. J. ,Reeves A. P. ,A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition [J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing ,1992 ,54 :438 - 460.
- [3] Sluzek A. ,Identification and inspection of 2-D objects using new moment-based shape descriptors [J]. Patter Recognition Letters ,1995 ,16 :687 - 697.
- [4] Gurevich G. B. ,Foundations of the theory of algebraic invariants [M]. Noordhoff ,Groningen ,The Netherlands ,1964.

作者简介:

陈佩 1975 年出生,上海交通大学自动化系博士,研究方向是图像处理和计算机视觉.

许晓鸣 1957 年出生,教授,博士生导师,上海交通大学副校长,研究方向是智能控制.

(上接第 11 页)

零位误差和光轴与俯仰轴不正交度采用望远镜正倒镜法标定. 光电轴不匹配和重力下垂采用正倒镜自跟踪法标定,即天线分别正倒镜对标校塔电标自跟踪,同时分别从天线望远镜观测标校塔上光标一和光标二的脱靶量.

3 电轴标校

光学标校需要在能见度好的天气下进行. 夜晚进行标校时,需在光标中心安装光标灯配合. 望远镜一般安装在较高位置,在进行倒镜时,很难观测. 受天线运行惯性的影响,要使光轴对准光标,往往需要花费很多时间进行仔细的反复调整.

天线自跟踪是一个动态平衡过程,当天线对电标自跟踪时,实际上它在小范围内是摆动的,此时从望远镜中读光标的脱靶量,很难读得准,只能取概略的中间值.

望远镜本身的精度及其安装稳定度、光标安装的准确度也是考虑的因素.

由于实际跟踪目标运动的是电轴,因此我们研究直接用其作基准进行标校,以消除光学标校所带来的不便. 实践证明这是一种切实可行的有效方法.

利用电轴作基准进行标校时,可以一次标定出零位误差、机械轴与电轴不匹配误差、重力下垂误差,而与光轴有关的各误差项不再需要,可以省略掉望远镜.

标校时首先进行校相,把雷达的自跟踪通道调整好,误差灵敏度调整为额定值,使雷达可以对标校塔电标自跟踪. 然后进行以下工作.

正镜自跟踪:天线正镜对准标校塔上电标进行自跟踪. 计算机用最大数据采样率记录一段数据.

倒镜自跟踪:天线倒镜对准标校塔上电标进行自跟踪. 计算机用相同的数据采样率记录同长度的一段数据.

将记录数据进行处理,计算其均值及方差. 求得正镜自跟踪平均值 A_{PB} 、 E_{PB} 以及其均方差,倒镜自跟踪平均值 A_{MA} 、 E_{MA} 及其均方差. 如果均方差超过允许的指标,则重新调整自跟踪通道重新进行标定.

由下列式子计算:

$$A_0 = A_b + (180 - A_{PB} - A_{MA}) / 2 \quad (1)$$

$$E_0 = (180 - E_{PB} - E_{MA}) / 2 \quad (2)$$

$$K = (A_{MA} - A_{PB} - 180) / 2 \quad (3)$$

$$E_{mg} = E_b + (E_{MA} - E_{PB} - 180) / 2 + 0.003 \quad (4)$$

这里 A_0 为方位角零位误差, E_0 为俯仰角零位误差, K 为机械轴与电轴不匹配误差, E_{mg} 为重力下垂误差. A_b 、 E_b 是天线三轴原点对标校塔电标的大地测量值.

其它各误差项的标定,仍可沿用第二节的常规标校方法.

4 结语

望远镜是天线安装调整时的辅助光学工具,也是传统的标校基准. 但实践上,光学标校准确度较难控制,一致性差;由于望远镜随雷达天线安装于室外环境,因而标校工作较为困难.

利用电轴直接进行标校,工作量小,一次可标定出多个误差系数,而且全部在室内进行,工作时只需在监控台上进行操控即可,工作环境大大改善. 它消除了光学标校易于带进的各项误差. 充分利用了计算机采集数据和处理数据的能力,通过采集大量数据并加以处理,提高了标校的准确度. 此外,它不受气候限制,可随时进行.

实际工作表明,电轴标校的准确度和易行性远较望远镜标校为佳,一致性好. 由于现代电子技术的发展,使得接收机的调整和测量数据的采集、传输和处理都变得比较容易(例如自动校相),实时性也大为提高,因此,在电轴标校的基础上,进而实现远程监控标校也是可以的.