规则图像特征的标准互相关相似函数

孙明磊 张 融 朱小峰

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191) (北京市劳动保护科学研究所，北京 100054)

宗光华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：利用标准互相关算子对机器视觉领域常用的十字图像特征进行匹配运算，发现相似函数在峰值区域的分布特征为4个互相对称的双曲面.受此启发，对规则几何图像特征(如矩型、圆型等)的标准互相关相似函数展开了研究.以图像特征概率分布的形式给出了NCCO算子在二值图像匹配下的相似函数计算式.推导并证明了矩型、圆型等典型图像特征相似函数在峰值点区域具有确定的数学模型.基于上述数学模型，在微装配显微视觉系统上进行了实验验证，对模板优化、图像特征的尺寸等优化方法进行了探讨.上述结论对图像定位、图像标定、图像跟踪等技术研究具有实用价值.

关 键 词：视觉；图像；相关方法；模式匹配

中图分类号：TP 242.6^{+}2

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)12-1441-04

Normalized cross correlation computation for geometry image features

Sun Minglei Zhang Rong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhu Xiaofeng

(Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China)

Zong Guanghua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Normalized cross correlation operator (NCCO) was used for pattern matching to localize popular cross-shaped features in microscopic vision. Distribution feature of similarity function around peak zone was found to be four symmetry hyperboloid planes. Inspired by this, some research work on pattern matching of geometry image features (such as rectangular, circular, etc.) was presented. A probability distribution based formula computing NCCO with two binary images was proposed. Mathematic models of some typical geometry image features' (rectangular, circular, cross-type, box-type) similar functions around peak point were derived from and proved. Based on these models, some experiments about template image optimum and feature size optimum were conducted on a microscopic vision workcell. Conclusions above are practically useful to image positioning, image calibration and image tracking techniques.

Key words: vision; image; correlation method; pattern matching

具有规则几何特征的图像特征常被用于视觉标定、视觉引导、视觉对准、目标跟踪等领域.典型如矩型标记、十字型标记、方框型标记、圆型标记等，在键和对准、光刻对准、工业图像配准、微装配

收稿日期：2007-12-23

基金项目：中国博士后科学基金资助项目(20070420287)；国家863计划资助项目(2004AA404260)

作者简介：孙明磊(1974—)，男，湖北襄樊人，博士后，sunminglei@gmail.com.

等领域有着广泛的应用[1-3].

与复杂的自然图像相比,对规则图像特征进行匹配识别的标准互相关函数(NCCO,Normalized Cross Correlation Operator)在峰值点附近具有非常简单的数学表达[3].这使得基于相关的亚像素定位方法在精密测量、机器视觉等领域具有较大的研究价值.

本文首先对二值图像的NCCO计算进行了推演,得到一种计算方法.并以此方法为基础,对几种典型的规则图像特征相似函数进行了推导,得到其相似函数的解析形式,进而对其一些重要特性展开了分析.

1 二值图像的NCCO表达

I与T均为只包含两种灰度的二值图像.设T中包含n_{th}个灰度值为g_{th}的像素构成了图像特征,同时由n_{tl}个灰度值为g_{tl}的像素构成了图像背景.I_{xy}是I在任意位置(x,y)子图,其大小为$m\times n$;设I_{xy}中包含n_{oh}个灰度值为g_{oh}的像素构成了图像特征,同时包含n_{ol}个灰度值为g_{ol}的像素构成了图像背景.对于NCCO算子[4]:

$$C(x,y)=\frac{\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left[\left(I_{xy}(i,j)-\overline{I_{xy}}\right)\cdot\left(T(i,j)-\overline{T}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(I_{xy}(i,j)-\overline{I_{xy}}\right)^2\cdot\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(T(i,j)-\overline{T}\right)^2}} \tag{1}$$

有$\overline{I_{xy}}=\dfrac{g_{\text{oh}}\cdot n_{\text{oh}}+g_{\text{ol}}\cdot n_{\text{ol}}}{mn}$,其中$n_{\text{oh}}+n_{\text{ol}}=mn$,则

$$I_{xy}(i,j)-\overline{I_{xy}}=\begin{cases}\dfrac{(g_{\text{oh}}-g_{\text{ol}})\cdot n_{\text{ol}}}{mn} & I_{xy}(i,j)=g_{\text{oh}}\\ \dfrac{(g_{\text{ol}}-g_{\text{oh}})\cdot n_{\text{oh}}}{mn} & I_{xy}(i,j)=g_{\text{ol}}\end{cases}$$

$$\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(I_{xy}(i,j)-\overline{I_{xy}}\right)^2}=\frac{g_{\text{oh}}-g_{\text{ol}}}{mn}\sqrt{n_{\text{oh}}n_{\text{ol}}(n_{\text{oh}}+n_{\text{ol}})} \tag{2}$$

同理,对于模板图像T:

$$\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(T(i,j)-\overline{T}\right)^2}=\frac{g_{\text{th}}-g_{\text{tl}}}{mn}\sqrt{n_{\text{th}}n_{\text{tl}}(n_{\text{th}}+n_{\text{tl}})} \tag{3}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left[\left(I_{xy}(i,j)-\overline{I_{xy}}\right)\cdot\left(T(i,j)-\overline{T}\right)\right]=\frac{(g_{\text{oh}}-g_{\text{ol}})(g_{\text{th}}-g_{\text{tl}})}{mn}\cdot(n_1n_{\text{ol}}n_{\text{tl}}-n_2n_{\text{ol}}n_{\text{th}}-n_3n_{\text{oh}}n_{\text{tl}}+n_4n_{\text{oh}}n_{\text{th}}) \tag{4}$$

其中,n_1,n_2,n_3,n_4分别为4种乘积形式出现的频数,有$n_1+n_2+n_3+n_4=mn$.

综合式(2)~式(4),得二值图像的NCCO算子:

$$C(x,y)=\frac{n_1n_{\text{ol}}n_{\text{tl}}-n_2n_{\text{ol}}n_{\text{th}}-n_3n_{\text{oh}}n_{\text{tl}}+n_4n_{\text{oh}}n_{\text{th}}}{mn\sqrt{n_{\text{oh}}n_{\text{ol}}n_{\text{th}}n_{\text{tl}}}} \tag{5}$$

式(5)是下述研究工作的基础.

2 典型规则图像的相似函数

1) 矩型图像特征

设图像大小为$m\times n$,其中正方型图像特征由$a\times b$像素构成,见图1.

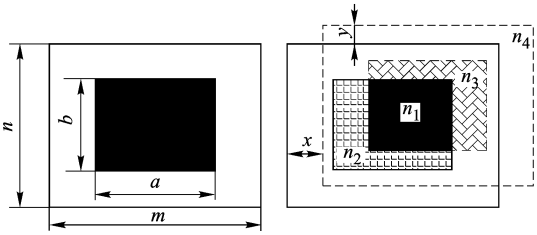


图1 矩型图像特征的模板匹配

x和y为图像特征的匹配偏移量,有

$$\left.\begin{aligned}n_{\text{oh}}&=ab\\ n_{\text{ol}}&=mn-ab\\ n_{\text{th}}&=ab\\ n_{\text{tl}}&=mn-ab\end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}n_1&=ab-(bx+ay-xy)\\ n_2&=bx+ay-xy\\ n_3&=bx+ay-xy\\ n_4&=mn-ab-(bx+ay-xy)\end{aligned}\right\}$$

$$n_1n_{\text{ol}}n_{\text{tl}}-n_2n_{\text{ol}}n_{\text{th}}-n_3n_{\text{oh}}n_{\text{tl}}+n_4n_{\text{oh}}n_{\text{th}}=abmn(mn-ab)-m^2n^2(bx+ay-xy)$$

为区别起见,矩型图像特征在第一卦限的相似函数用$z_{\text{s}}^1(x,y)$表示,有

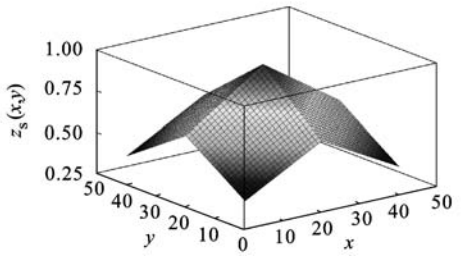
$$z_{\text{s}}^1(x,y)=1-\frac{mn}{ab(mn-ab)}(bx+ay-xy) \tag{6}$$

由图像特征的对称性,不难得到矩型(包括正方型)图像特征的相似函数在峰值区域的分布形式为4个互相对称的双曲面,见图2a.

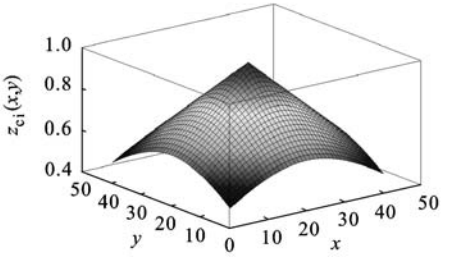
2) 圆型图像特征

对于圆型图像特征(参见图3),有

$$\left.\begin{aligned}n_{\text{oh}}&=n_{\text{th}}=\pi r^2\\ n_{\text{ol}}&=n_{\text{tl}}=mn-\pi r^2\end{aligned}\right\}$$



a　矩形特征



b　圆形特征

图 2　不同形状特征的相似函数

$$\left.\begin{aligned} n_1 &= 2r^2\theta - r\sqrt{x^2+y^2}\sin\theta \\ n_2 &= \pi r^2 - n_1 \\ n_3 &= \pi r^2 - n_1 \\ n_4 &= mn - n_1 - n_2 - n_3 \end{aligned}\right\}$$

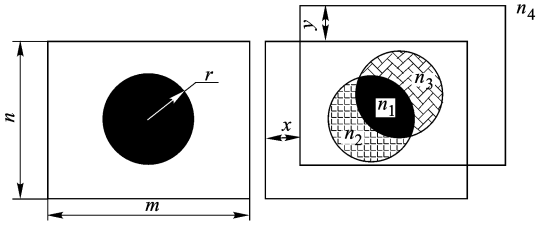


图 3　标准圆型图像特征的模板匹配

依据式(5),圆型图像特征的相似函数可表示为

$$z_{ci}(x,y) = \frac{(2mnr\theta - \pi^2 r^3) - mn\sin\theta\sqrt{x^2+y^2}}{\pi r(mn - \pi r^2)} \tag{7}$$

式(7)表达过于抽象,不利于实际应用,可变换为简单形式.

令 $\theta = \arccos\dfrac{\sqrt{x^2+y^2}}{2r}$,式(7)变换为

$$z_{ci}(x,y) = 1 - \frac{mn}{mn - \pi r^2}\,\frac{\dfrac{\pi/2}{\cos\theta} - \dfrac{\theta}{\cos\theta} + \sin\theta}{\pi r}\sqrt{x^2+y^2}$$

令

$$f(\theta) = \frac{\pi/2 - \theta}{\cos\theta} + \sin\theta$$

有 $\lim\limits_{\theta\to\frac{\pi}{2}} f(\theta) = 2$,得到

$$z_{ci}(x,y) \approx 1 - \frac{2mn}{\pi r(mn - \pi r^2)}\sqrt{x^2+y^2} \tag{8}$$

式(8)表明:圆型图像特征的相似函数在峰值区域的分布形式为圆锥曲面,见图 2b.

3　讨　论

1) 模板优化

使用模板匹配算法进行图像特征定位,模板的选择与制作对于实现算法的精度与鲁棒性非常关键[5].对于各种图像特征的本质认识(见式(6)、式(8)),对于模板优化意义重大.

以矩型特征为例,将式(6)变换为

$$z_s^1(x,y) = 1 - \frac{1}{1 - \dfrac{ab}{mn}}\left(\frac{1}{a}x + \frac{1}{b}y - \frac{1}{ab}xy\right)$$

定义特征比 $\tau = ab/mn$,则

$$f(\tau) = 1/(1-\tau) \qquad 0 < \tau < 1$$

有

$$z_s^1 = 1 - f(\tau)\cdot\left(\frac{1}{a}x + \frac{1}{b}y - \frac{1}{ab}xy\right) \tag{9}$$

当 a 和 b 一定时,$f(\tau)$对式(9)影响较大.为方便讨论,研究式(9)与平面 $x=y$ 的交线,即

$$z_s^1 = 1 - f(\tau)\cdot\left[\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)x - \frac{1}{ab}x^2\right]$$

图 4 给出了 a 和 b 一定时,z_s^1 随 τ 变化的曲线族.图 4 说明:随着 τ 的增加,z_s^1 曲面变陡.

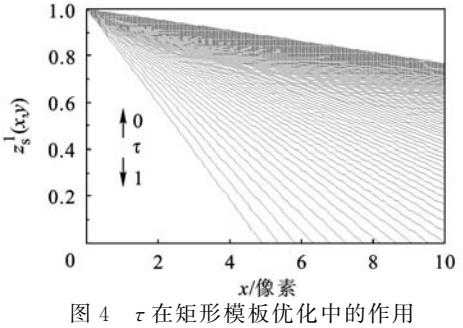


图 4　τ 在矩形模板优化中的作用

对于圆型图像特征,同样有

$$z_{ci}(x,y) = \frac{\left(\dfrac{2}{\pi}\theta - \dfrac{\pi r^2}{mn}\right) - \dfrac{1}{\pi r}\sin\theta\sqrt{x^2+y^2}}{1 - \dfrac{\pi r^2}{mn}}$$

令 $\tau = \pi r^2/mn$,其中 $0<\tau<1$.

有

$$z_{ci} = \frac{\left(\dfrac{2}{\pi}\theta - \tau\right) - \dfrac{1}{\pi r}\sin\theta\sqrt{x^2+y^2}}{1-\tau} \tag{10}$$

图 5 给出了当 r 一定时,z_{ci} 随 τ 变化的曲线族.图 5 说明:随着 τ 的增加,z_{ci} 曲面变陡.

对于模板匹配算法而言,$C(x,y)$ 具有更陡的曲面,有助于提高算法的抗噪能力[6],从而提高模板匹配的定位精度.式(9)、式(10)为模板的设计

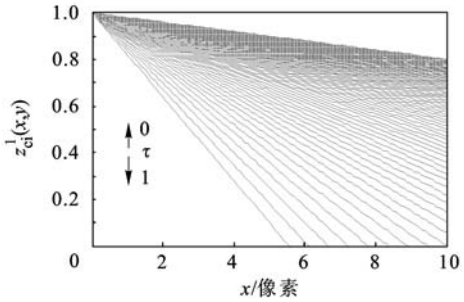


图5 τ在圆形模板优化中的作用

提供了理论依据.

2) 圆型图像特征的模型优化

当图像特征边界由不全是与像平面坐标系平行的线条组成时,数字图像的离散化特点导致本文方法对NCCO的描述并不总是准确,而与部分参数的优化有关.

如图6反映了圆型图像特征相似函数的圆锥曲面模型$z_{ci}(x,y)$对实际图像匹配值$C(x,y)$之间的描述误差较大.定义参数Δ体现这种误差(见式(11)).

$$\Delta=\sum_{x=1}^{n}\sum_{y=1}^{m}\left|z_{ci}(x,y)-C(x,y)\right| \quad (11)$$

实验证明,特征比τ与圆半径r对Δ影响较大.

图7表明:在r一定情况下($r=40$),$\tau\in$(0.40,0.45)时,Δ较小;图6表明:在τ一定情况下($\tau=0.196$),$r=40$时,Δ最小.即优化参数τ与r将使得$z_{ci}(x,y)$对$C(x,y)$的描述足够准确.

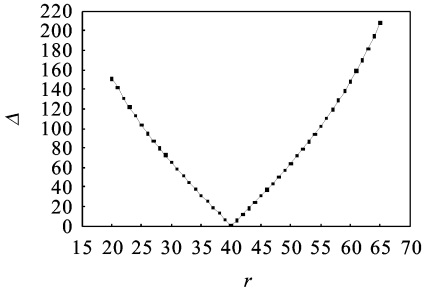


图6 特征比系数r对圆型特征相似函数Δ的影响($\tau=0.196$)

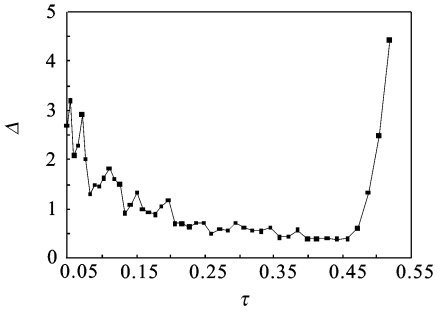


图7 特征比系数τ对圆型特征相似函数Δ的影响($r=40$)

4 结 论

1) 以图像特征概率分布的形式给出了NCCO算子在二值图像匹配下的相似函数计算式;

2) 推导并证明了矩型、圆型等典型图像特征相似函数在峰值点区域具有确定的数学模型;

3) 基于上述数学模型,对模板优化、图像特征的尺寸等优化方法进行了简略探讨.

本文结论可适用于图像的轮廓曲线具有确定数学表达式的情况;上述研究方法对于将规则图像特征(如十字型、方框型等)的模板匹配方法拓展应用至机器视觉领域中的图像定位、图像标定、图像跟踪等技术研究中具有实用价值;另外,在确定数学模型指导下研究模板匹配,可以使该方法具有更好的鲁棒性.

参考文献 (References)

[1] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社,2002:132-134
Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. Precision measurement and motion measurement based on image[M]. Beijing: Publishing House of Science, 2002:132-134(in Chinese)

[2] Milan S, Vaclav H, Roger B. Image processing, analysis, and machine vision[M]. Washington DC: Brooks and Cole Publishing of Thomson, 1998:622-623

[3] Ge Yang. Scale-based integrated microscopic computer vision techniques for micromanipulation and micro assembly[D]. Minnesota: The Graduate School of the University of Minnesota, 2004

[4] 孙明磊,李大寨,余志伟,等. 基于NCCO的十字图像特征亚像素定位[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(7):780-784
Sun Minglei, Li Dazhai, Yu Zhiwei, et al. Locating cross-shaped image feature with subpixel accuracy based on NCCO [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(7):780-784(in Chinese)

[5] Brown L G. A survey of image registration techniques[J]. ACM Computer Surveys, 1992, 24(4):325-376

[6] 孙明磊. 显微视觉图像分析技术应用及实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2006
Sun Minglei. Application and experimental research on image-analysis based methodology in microscopic computer vision[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)