

文章编号:1007-2780(2011)06-0858-05

## 基于相位相关的目标图像亚像元运动参数估计

孙 辉, 马天玮

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn)

**摘要:** 为获取亚像元级目标运动参数, 提出一种基于相位相关分析的图像配准方法。首先讨论了目标局部运动和全局运动的目标参数估计问题, 通过图像减影运算和模块匹配方法实现粗配准, 从全景图像中分离目标信息和背景信息, 计算目标中心坐标, 获取像元级运动参数; 然后采用相位相关图像配准方法实现精配准, 利用傅里叶变换的平移特性, 对产生平移的目标图像, 通过求解归一化的互功率谱的傅立叶逆变换, 得到二维脉冲函数, 其峰值对应图像位移, 由此获取亚像元级位移量。在实验室通过自准直光学系统获取光斑运动图像, 使用 Leica 经纬仪标定光斑运动参数精度。结果表明, 该方法效果显著, 最大配准误差为 0.156, 标准差为 0.091, 配准精度优于 1/10 像元。

**关键词:** 相位相关; 亚像元; 图像配准; 运动估计

中图分类号: TP391 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20112606.0858

## Sub-Pixel Motion Estimation Based on Phase-Only Correlation

SUN Hui, MA Tian-wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn)

**Abstract:** A high accuracy sub-pixel-level motion estimation of algorithm based on phase-only correlation was proposed. This algorithm consists of two steps: one for pixel-level correspondence estimation and the other for sub-pixel-level correspondence estimation. In pixel-level estimation, the method of image subtract or method of template matching are used to find the target image in the original input images for two classes of motion, namely local motion and global motion, then the pixel-level image shift enables to be detected coarsely by calculating the coordinate of center of the target image. In sub-pixel-level estimation, the method of image registration based on phase-only correlation(POC) is employed to detect sub-pixel-level displacement, which applies the translation characteristics of Fourier transform to search translation between images. The 2-D inverse Fourier transform for the normalized cross spectrum is a 2-D impulse function, the impulse enables to determine the translation displacement from the location of the correlation peak, so as to obtain finely image displacement. The method described in this paper has been applied to the experimental of registration of light-spot from autocollimator. The result shows that this method can detect sub-pixel-level shift parameters accurately and efficiently, which makes possible to estimate the displacement with 0.1-pixel accuracy, the maximum error of registration is only 0.156-pixel, and the root of mean square error of image registration is better than 0.091-pixel.

**Key words:** phase-only correlation; sub-pixel-level; image registration; motion estimation

收稿日期: 2011-03-15; 修订日期: 2011-05-04

基金项目: 973 国家重点基础研究发展计划(No. 2009CB72400607); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No. 2008AA121803)

作者简介: 孙辉(1963-), 男, 吉林柳河人, 研究员, 主要从事数字图像处理及计算机仿真研究。

## 1 引言

目标识别与跟踪是计算机视觉研究领域的热点,在医学成像、航空遥感、运动分析、工业检测、军事侦察等领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。如何快速准确地获取目标运动信息,是目标识别与跟踪的关键技术之一。近几十年来,广大专家学者做了深入探索和研究,在优化算法、提高运动估计精度等方面提出了许多行之有效的方法。目前较为常用的目标运动估计方法主要有基于图像灰度信息方法<sup>[5]</sup>、基于图像分块运动矢量分析方法<sup>[6]</sup>、基于图像梯度相关方法<sup>[7]</sup>、基于图像特征信息方法<sup>[8-9]</sup>、基于傅立叶变换的频域处理方法<sup>[10-11]</sup>等,这些方法大多是像元级的。在医学成像、航空遥感、精密检测等很多领域,为提取更准确的图像信息,通常需要亚像元(Sub-pixel)级的运动信息。

由于亚像元级配准具有非常重要的应用价值,近年来得到了学术界的普遍关注。在基于傅立叶变换的相位相关配准研究基础上,文献<sup>[12]</sup>提出了一种扩展的相位相关(Phase-Only Correlation, POC)法,通过理论分析将其扩展到亚像素级配准精度。该方法只提取两幅图像互功率谱中的相位信息,减少了对图像内容的依赖,具有较强的抗干扰能力,是目前广泛使用的频域配准方法<sup>[13-15]</sup>。

本文提出一种基于相位相关的目标参数估计方法。首先对图像进行降噪处理,分别讨论了目标局部运动和全局运动的运动参数估计问题,通过采用图像减影运算和模板匹配算法实现目标图像粗配准,获得像元级的运动参数;然后采用扩展的相位相关算法,通过分析图像之间的互功率谱信息,实现目标图像精配准,获取目标图像的亚像元级运动信息。文中通过光斑运动图像对相位相关配准方法作了实验验证,结果表明,本文方法具有较高的计算精度。

## 2 图像预处理—图像降噪和粗配准

### 2.1 图像降噪

在图像生成、传输、采集过程中,由于各种因素的影响产生噪声,因此,在估计图像运动之前需对原始图像进行降噪处理。一般来说,图像噪声中主要包括高斯噪声、脉冲噪声等。图像降噪的目标是通过选择适当的滤波算法,既要有效地抑

制噪声,又要保持图像的特征信息不丢失。

中值滤波是非线性滤波,在去除图像中孤立的噪声点方面效果明显,同时在一定程度上能够保持图像的细节不变。中值滤波一般公式为:

$$g(x, y) = \text{median}[f(x - k, y - l), (k, l) \in w] \quad (1)$$

这里  $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$  分别表示原始图像和滤波结果图像,  $w$  表示滤波窗。实际运用中需根据要求选取适当大小的滤波窗。

### 2.2 局部运动配准

在计算机视觉研究领域,一般将目标局部运动归类于静态背景下的目标检测。静态背景运动目标检测相对比较容易,采用图像减影算法可以收到较好的效果。图像减影是对观测图像与背景图像做减法运算,即事先将采集到的背景图像保存起来,当目标进入视场时,对有目标的全景图像与背景图像按像元对应位置的灰度值相减,由于目标灰度和背景灰度之间的差异,在目标所在区域的图像相减结果值比较大,其他区域结果值比较小,会得到比较明显的目标图像。

对经过上述减影运算得到的目标图像进行二值化处理并计算图像质心。通过分析图像质心位置即可获取目标图像的运动参数信息。

设二值化图像为  $f(x, y)$ , 图像尺寸  $M \times N$ 。根据定义,  $f(x, y)$  满足下述条件:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \text{目标区域} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

则目标质心  $M(x_m, y_m)$  由下式给出:

$$x_m = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x \times f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)} \quad (3)$$

$$y_m = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N y \times f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)} \quad (4)$$

通过算法分析可知,其配准精度最高为 0.5 像元。

### 2.3 全局运动配准

相对于局部运动来说,全局运动估计更复杂,由于目标运动对背景运动的影响,使得一般的运动估计算法的处理能力受到限制,需要更多的目标运动的先验知识。

模板匹配是全局运动估计中比较常用的方法,一般可实现像元级的图像配准精度。其基本

思想是在参考图像或图像库中选择一个含有目标图像的模板 A 后,在观测图像中搜索与之相匹配的图像块 B,然后根据两幅图像之间的位移关系确定目标运动参数信息。

设模板 A 图像为  $f_A(u, v)$ , 图像尺寸为  $m \times n$ ; 观测图像为  $f(x, y)$ , 图像尺寸为  $M \times N$ 。选择下面标准化的相关函数评价模板 A 与观测图像的匹配程度:

$$C(p, q) = \frac{\sum_{x=p}^{p+m} \sum_{y=q}^{q+n} \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n [f_A(u, v) - f(x, y)]^2}{\sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n f_A^2(u, v) \times \sum_{x=p}^{p+m} \sum_{y=q}^{q+n} f^2(x, y)} \quad (5)$$

在实际应用过程中,为适应图像信息变化情况,减少匹配误差,往往根据匹配程度更新模板,即将当前目标图像作为新的模板,以此获取准确的目标运动信息。所以模板匹配具有运算简单、算法灵活、匹配度高、易于硬件实现等优点。其缺点是由于要遍历整幅图像,所以计算量较大。通过选择适当的快速搜索算法可以减少搜索次数,提高模板匹配速度。

### 3 相位相关配准-精配准

根据傅立叶变换平移理论,当图像之间发生平移时,傅立叶变换幅值不变,互功率谱的相位等于两个图像的相位差,通过求解归一化的互功率谱的傅立叶逆变换,得到二维 Dirachlet 冲激函数,其坐标位置给出了两个图像之间的位移量。

设图像尺寸  $M \times N$ ,  $f_1(x, y)$  为基准图像,  $f_2(x, y)$  为  $f_1(x, y)$  平移  $(x_0, y_0)$  后的位移图像,两者满足如下关系:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (6)$$

式(6)傅立叶变换可表示为

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)] \quad (7)$$

式(7)中,  $F_1(u, v)$  和  $F_2(u, v)$  分别表示  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$  的傅立叶变换。因此,两幅图像之间归一化的互功率谱表示为

$$\frac{F_2(u, v) F_1^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_1^*(u, v)|} = \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)] \quad (8)$$

将式(8)两端进行傅立叶逆变换,可得相位相关函数的表达式如下:

$$POC(x, y) = F^{-1} \{ \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)] \} = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (9)$$

式(9)中:  $\delta(x - x_0, y - y_0)$  是典型的 Dirachlet 冲激函数,该函数在中心点  $(x_0, y_0)$  处不为零,在其它位置都为零。图 1(a)、1(b) 分别显示了位移为 0 和 0.5 像素位移情况下的相位相关曲线。

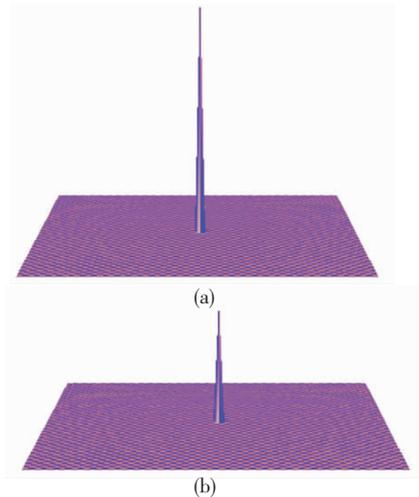


图 1 相位相关函数。(a)  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ , (b)  $(x_0, y_0) = (0.5, 0)$

Fig. 1 3-D plots of the phase-only correlation function (a) for the case  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ , (b) for the case  $(x_0, y_0) = (0.5, 0)$ .

为求解位移量  $(x_0, y_0)$ , 文献[12]提出了一种用 Sinc 函数近似表示 Dirachlet 函数的方法:

$$C(x, y) = \frac{\sin[\pi(Mx - x_0)]}{\pi(Mx - x_0)} \frac{\sin[\pi(Ny - y_0)]}{\pi(Ny - y_0)} \quad (10)$$

$C(x, y)$  曲线见图 2。

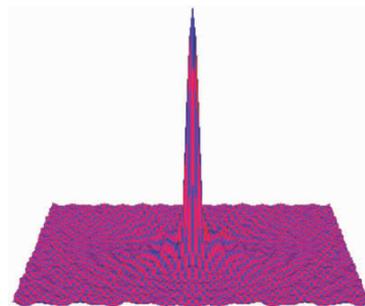


图 2 函数曲线  $C(x, y)$

Fig. 2 3-D plots of  $C(x, y)$

由式(10)可解得位移量  $(x_0, y_0)$

$$\Delta x = \frac{x_0}{M} = \frac{C(1, 0)}{C(1, 0) \pm C(0, 0)}$$

$$\Delta y = \frac{y_0}{N} = \frac{C(0,1)}{C(0,1) \pm C(0,0)} \quad (11)$$

## 4 实验结果

### 4.1 实验装置

为验证本文方法,在实验室进行了光斑运动图像配准仿真实验。实验装置包括一台 Leica 经纬仪、自准直光学系统、高速数字 CMOS 相机及计算机等。其中 Leica 经纬仪测角精度为  $0.5''$ , 自准直光学系统焦距  $f = 281.6 \text{ mm}$ , 光斑直径  $\phi = 100 \mu\text{m}$ 。数字相机传感器像元尺寸为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ , 帧频为 500 帧/s, 图像分辨率  $1280 \times 1024 \times 8 \text{ bit}$ 。实验装置如图 3 所示。

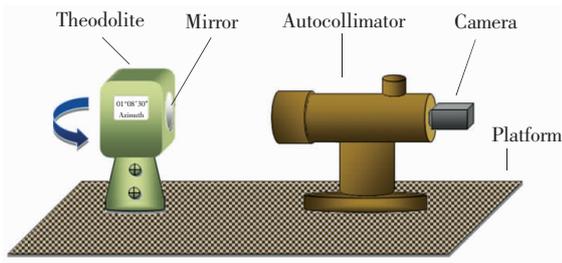


图 3 光斑图像配准实验装置

Fig. 3 Setup of experimental system

系统工作时,自准直光学系统的星点孔与数字相机传感器靶面共轭。光线通过星点孔,经自准直光学系统反射镜到达 Leica 经纬仪上的反射镜后,光线返回到达 CMOS 相机传感器靶面,CMOS 相机实现光信号到数字信号转换。计算机通过串行通信发送指令控制 Leica 经纬仪偏转,可实现光斑影像在传感器靶面上的位移效果。

光斑图像的位移量和 Leica 经纬仪旋转角度  $\theta$  关系如下:

$$K_{\text{shift}} = \frac{f \times \tan(\theta)}{\beta} \quad (12)$$

式中:  $K_{\text{shift}}$  为位移量,单位像元;  $\theta$  为 Leica 经纬仪示数;  $f$  为光学系统焦距;  $\beta$  为传感器像元尺寸。

本文采用标准差 (Standard Deviation) 客观评价光斑图像配准精度,计算公式如下:

$$K_{\text{SD}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - L_i)^2} \quad (13)$$

$T_i$  为测试位移,  $L_i$  为 Leica 经纬仪角度解算的位移真值,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

### 4.2 实验分析

在实验室通过 Leica 经纬仪调整反射镜角度,每次将 Leica 经纬仪转过  $5'$  后,记录经纬仪角度数据,用于计算光斑图像位移真值,采集图像并使用本文方法进行光斑图像配准,估计两幅光斑图像之

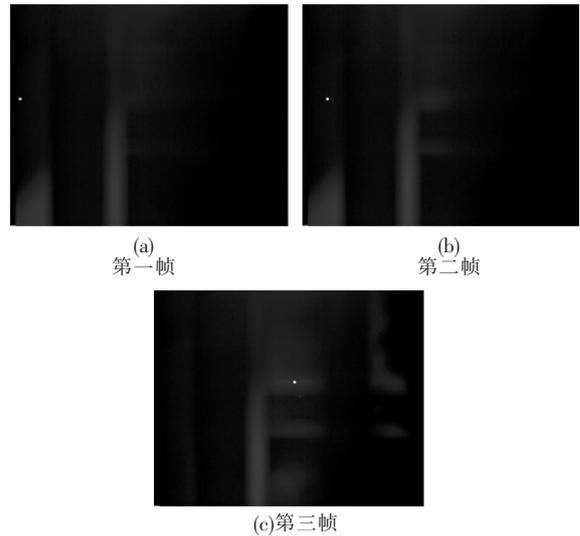


图 4 光斑序列图像

Fig. 4 Light spot sequence. (a) 1<sup>st</sup> frame; (b) 2<sup>nd</sup> frame, (c) 10<sup>th</sup> frame.

表 1 图像配准误差

Table 1 Error of registration

序号	配准误差/pixel
1	0
2	0.082
3	-0.022
4	0.007
5	0.153
6	0.071
7	0.011
8	0.032
9	-0.096
10	0.021
11	-0.085
12	0.139
13	-0.156
14	0.162
15	0.112
16	0.016
17	-0.059
18	0.006

间的位移量。共计采集 18 帧图像。原始图像见图 4, 配准结果见表 1, 配准误差曲线见图 5。从实验结果可以看出, 采用本文方法, 最大配准误差为

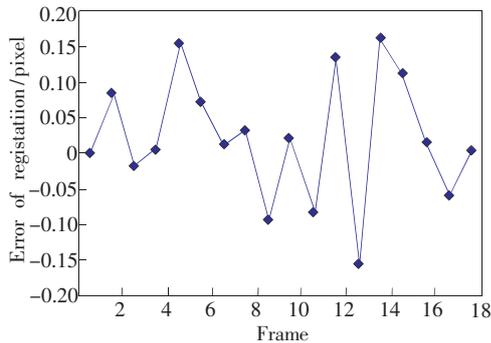


图 5 配准误差曲线

Fig. 5 Curve of error

0.156, 标准差为 0.091, 配准精度优于 1/10 像元。

## 5 结 论

根据目标运动估计精度高、算法稳定的要求, 提出了一种基于相位相关的目标图像运动估计方法。针对目标局部运动和全局运动的不同特点, 介绍了图像减影运算和图像模板匹配算法, 实现了像元级图像运动参数估计。重点讨论了相位相关算法的基本原理及算法实现, 最后介绍了实验装置及实验过程。理论分析和实验结果表明, 相位相关算法在处理图像平移和旋转过程中利用图像的互功率谱信息, 减少了对图像内容的依赖, 具有较强的抗噪能力; 同时该算法具有亚像元级的配准精度, 能有效提高目标运动的检测精度。

## 参 考 文 献:

- [1] 康晓晶, 吴谨. 基于高斯背景建模的目标检测技术 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(3): 454-459.
- [2] 程明明, 王贺, 安平, 等. 基于特征点匹配的多视图图像校正 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(4): 593-597.
- [3] 张传胜, 邵春雷. 人眼像差校正仪视网膜微血管图像拼接 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(6): 884-889.
- [4] 刘扬, 张云峰, 董月芳. 复杂背景下抗遮挡的运动目标跟踪算法 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(6): 890-895.
- [5] Ko S J, Lee S H, Jeon S W, et al. Fast digital image stabilization based on gray-coded bit-plane matching [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, 45(3): 598-603.
- [6] Vella F, Castorina A, Mancuso M, et al. Digital image stabilization by adaptive block motion vectors filtering [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2002, 48(3): 796-801.
- [7] Argyriou V, Vlachos T. Sub-pixel motion estimation using gradient cross-correlation [C] // *The 7th International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA)*, Paris, France; IEEE, 2003: 1-4.
- [8] 姚军, 蒋晓瑜, 杜登崇, 等. 使用粒子滤波器实现电子稳像 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1005-1110.
- [9] 李轶博, 李小兵, 周娴. 基于 FPGA 的快速中值滤波器设计与实现 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(2): 292-296.
- [10] Erturk S. Digital image stabilization with sub-image phase correlation based global motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1320-1325.
- [11] 吴元昊, 于前洋. 基于傅里叶相位差的抗噪声位移估计算法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1137-1142.
- [12] Foroosh H, Zerubia J, Berthod M. Extension of phase correlation to sub-pixel registration [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2002, 11(3): 188-200.
- [13] 黎俊, 彭启民, 范植华. 亚像素级图像配准算法研究 [J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(11): 2071-2075.
- [14] 冯林, 管慧娟, 藤弘飞. 基于互信息的医学图像配准技术研究进展 [J]. 生物医学工程学, 2005, 22(5): 1078-1081.
- [15] 桂志国, 韩焱. 相位相关配准法及其在射线图像数字减影中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 520-522.