

文章编号: 1007-2780(2012)02-0223-06

相位相关技术实现离焦模糊图像运动估计

孙 辉

(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: 为解决离焦模糊图像的运动参数估计问题, 介绍一种采用相位相关分析的图像配准技术。该方法利用傅里叶变换的平移特性, 对产生平移的目标图像进行傅里叶变换, 计算位移图像之间归一化互功率谱, 其傅里叶逆变换对应二维脉冲函数, 通过计算脉冲函数峰值坐标获取位移图像之间的亚像素级位移量。结合相位相关配准原理和线性空间不变退化模型, 给出离焦成像系统点扩散函数及其光学传递函数的数学描述, 侧重讨论离焦模糊对相位相关配准结果的影响, 证明图像经过离焦退化后, 位移图像之间归一化的互功率谱具有不变性。动态运动模糊图像最大检测误差 0.339 像素, 标准差 0.19 像素。该方法具有可行性和有效性, 能够满足一般要求。

关 键 词: 相位相关; 离焦模糊; 归一化互功率谱; 图像配准; 点扩散函数

中图分类号: TP391

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122702.0223

Estimation of Displacement for Out-of-Focus Blurred Image Using Phase-Only Correlation

SUN Hui

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

Abstract: For solving the problem of displacement estimation for out-of-focus blurred images, the method of image registration based on phase-only correlation is introduced. The method is based on the translation characteristics of Fourier transform to search translation between images, the inverse Fourier transform of the normalized cross power spectrum of pairs images is a two dimension impulse function, and the translation displacement between images can be finely retrieved from the location of the correlation peak. The method of image registration of phase-only correlation combined with degradation model of spatially variant blur, the mathematical expression of PSF and OTF for out-of-focus blur is described, and the effect of blur on registration is discussed. The relation between variance of normalized cross power spectrum and degradation of blurred images is demonstrated, which is only dependent on the displacement between images and not on the blur in image. The experimental result shows that this method can detect sub-pixel-level shift parameters accurately and efficiently, the maximum error of registration is only 0.339-pixel. It is efficient and satisfies the system requirements.

Key words: phase-only correlation; out-of-focus blurred image; normalized cross power spectrum; image registration; point spread function

收稿日期: 2011-09-23; 修订日期: 2011-12-21

基金项目: 973 国家重点基础研究发展计划 (No. 2009CB72400607); 国防预研基金 (No. 402070301); 国家“863”计划 (No. 2008AA121803)

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

1 引 言

光学成像系统离焦是影响成像质量的重要因素,成像系统工作时,由于离焦作用,相机拍摄的视频图像会产生模糊效果,导致分辨率下降和信息丢失,最终影响到图像信息的处理与分析。根据图像复原理论,图像离焦模糊是一种由于成像系统光学模糊造成的视频图像退化现象^[1]。如何准确地从退化图像中获取有用的图像信息,是数字图像研究领域的研究热点之一。

视频序列图像运动估计是计算机视觉领域一个重要研究方向,也是许多智能视频系统(如目标检测、交通监控等)的基础和重要组成部分,其目的是为了从中获取有关感兴趣区域的目标运动信息。图像运动检测技术^[2-3]与其他一些图像处理技术如图像降噪、图像增强、图像复原、图像融合及图像超分辨率重建密切相关。一般来说,图像运动检测作为一种预处理手段,为图像的进一步处理与分析提供准确参数,因此运动检测结果至关重要。高精度的运动估计有助于利用图像之间的运动信息,提高后续图像处理的精度。目前比较常用的有图像灰度信息算法^[4]、目标特征匹配法^[5]、图像梯度相关方法^[6]等。在离焦模糊图像中,由于图像信息的混迭现象,许多有用的特征信息无法从图像中直接获取,因此,上述基于目标特征信息的检测效果会受到一定限制。

在计算机视觉研究领域,有关成像系统离焦造成图像退化方面的研究主要集中在退化图像恢复或重建^[7]、点扩散函数估计与应用^[8]、自动调焦系统设计等,关于如何从离焦模糊图像中获取图像之间位移参数少有报道。本文主要研究离焦模糊图像的运动参数估计问题,从实际需求出发,根据线性不变空间退化模型,结合目前广泛采用的相位相关图像配准技术^[9-10],通过理论分析和实验验证,研究和讨论离焦模糊退化图像对相位相关配准结果的影响,利用相位相关配准技术的高精度和鲁棒性,探索出一条适合离焦模糊图像运动检测的新思路和有效的技术途径。

2 相位相关配准原理

相位相关算法是一种非线性、基于傅里叶功率谱的频域相关技术,传统的相位相关方法具有像素级配准精度。近年来提出的扩展相位相关

(Phase only correlation, POC)算法将配准精度提高到亚像素级^[9]。该方法基于傅里叶变换的良好特性,对两幅图像之间的平移、旋转及尺度变化有较高的配准精度,同时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,因此具有较强的抗干扰能力。本文利用傅里叶变换的平移特性,通过图像运动模型,简要说明相位相关配准原理。

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,二者满足如下运动方程:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

式(1)作傅里叶变换,得到式(2):

$$f_2(u, v) = F_1(u, v) \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)] \quad (2)$$

式(2)中, $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别表示 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的傅里叶变换。因此,两幅图像之间归一化的互功率谱表示为:

$$\frac{F_2(u, v)F_1^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_1^*(u, v)|} = \exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)] \quad (3)$$

将式(3)两端进行傅里叶逆变换,可得相位相关函数表达式如下:

$$\text{POC}(x, y) = F^{-1}\{\exp[-j2\pi(ux_0 + vy_0)]\} = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (4)$$

式(4)中: $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 即典型的 Dirac 冲激函数,该函数在中心点 (x_0, y_0) 处不为零,在其他位置都是零。

为求解位移量 (x_0, y_0) ,文献[9]提出了一种用 Sinc 函数近似表示 Dirac 函数的方法。

$$C(x, y) = \frac{\sin\pi(Mx - x_0)}{\pi(Mx - x_0)} \frac{\sin(\pi(Ny - y_0))}{\pi(Ny - y_0)} \quad (5)$$

由式(5)可解得位移量 (x_0, y_0)

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x_0}{M} = \frac{C(1, 0)}{C(1, 0) \pm C(0, 0)} \\ \Delta y &= \frac{y_0}{N} = \frac{C(0, 1)}{C(0, 1) \pm C(0, 0)} \end{aligned} \quad (6)$$

3 离焦模糊图像分析

3.1 线性不变空间模糊模型

在线性不变空间退化模型中, $f(x, y)$ 表示物体的原始图像, $g(x, y)$ 表示实际得到的退化图像, $h(x, y)$ 表示点扩散函数(point spread function, PSF),则退化模型可表示为^[1]:

$$\frac{1}{d_f - d_z} + \frac{1}{d_i + \delta_z} = \frac{1}{f} \quad (14)$$

从公式(14)可以导出成像系统离焦量：

$$\delta_z = \frac{f(d_f - d_z)}{d_f - d_z - f} - d_i \quad (15)$$

光学系统点扩散函数描述了成像系统的成像特性,理想的点扩散函数是一个脉冲响应。在离焦成像系统中,目标图像可以认为是点扩散函数空间分布的总和。离焦模糊的点扩散函数 $h(x, y)$ 估计如下：

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2}, & (x, y) \in \{(x, y), x^2 + y^2 \leq R^2\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中, R 表示离焦半径。从 $h(x, y)$ 定义可以看出,离焦模糊的点扩散函数是一个二维脉冲响应函数。

根据傅里叶光学理论^[12],离焦成像系统光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)可表示为：

$$\text{OTF}(u, v) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) dx dy} = \frac{1}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{R^2}\right) \quad (17)$$

离焦成像系统光学传递函数如图 2 所示。

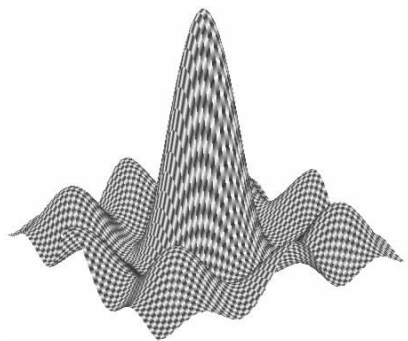


图 2 离焦系统光学传递函数

Fig. 2 Plot of OTF for out-of-focus

根据图像复理论及离焦系统点扩散函数或光学传递函数分析,离焦模糊符合线性不变空间退化模型要求。因此本文将相位相关配准方法用于解决离焦模糊图像的运动估计问题具有合理性和可行性,同时可以实现较高的运动检测精度。

4 实验结果

4.1 静态仿真实验-归一化互功率谱一致性验证

本文选用标准样本图像 Bridge 进行位移图像互功率谱一致性测试,原始图像尺寸为 $512 \times 512 \times 8$ bit,见图 3(a)。首先对原始图像在水平和垂直方向分别平移 -10 和 10 个像素,生成位移图像,见图 3(b),然后根据式(3)计算两幅图像之间归一化的互功率谱,见图 3(c)。

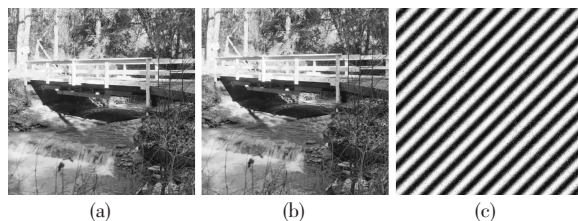


图 3 原始图像及位移图像。(a)原始图像;(b)位移图像;(c)互功率谱图像。

Fig. 3 Original image and displacement image for simulation. (a) Original image, (b) Motion image with displacements along both axes, (c) Normalized cross power spectrum between (a) and (b).

为验证位移图像之间归一化的互功率谱在经过离焦模糊前后的一致性,本文进行了对比实验,首先使用公式(9)和(10)分别对图 3 显示的原始图像和位移图像进行离焦模糊处理,点扩散函数选择公式(16)表示的脉冲函数,离焦模糊半径 $R=5$ 像素。模糊图像见图 4(a)、图 4(b)。然后根据式(13)计算两幅模糊图像之间归一化的互功率谱,见图 4(c)。

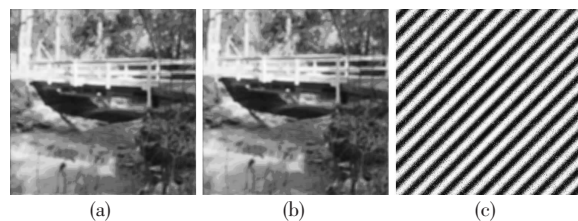


图 4 离焦及位移图像。(a)离焦模糊图像;(b)位移图像;(c)互功率谱图像。

Fig. 4 Out-of-focus blurred image and displacement image. (a) Out-of-focus blurred image with $R=5$ pixels, (b) Motion image with displacements along both axes, (c) Normalized cross power spectrum between (a) and (b).

比较图 3(c)和图 4(c)可知,模糊图像与原图像的位移图像之间归一化的互功率谱具有很好的

一致性。

4.2 动态运动估计实验-模糊图像位移量检测

为验证本文方法,在实验室进行了离焦模糊图像的运动检测实验。实验装置包括光学成像系统、高速数字 CMOS 相机,一台精密转台及计算机等。其中光学系统焦距 $f=150\text{ mm}$,数字相机传感器像元尺寸 $7\text{ }\mu\text{m}\times 7\text{ }\mu\text{m}$,帧频 25 f/s ,图像分辨率 $2\text{ }350\times 1\text{ }720\times 10\text{ bit}$,精密转台编码器测角精度 $1''$ 。

目标运动量与编码器角度数据关系如下:

$$d = \frac{f \times \tan(\omega T)}{\beta} \quad (18)$$

式中: d 为位移量,单位像元, f 为光学系统焦距, β 为传感器像元尺寸, ω 为转台角速率, T 为视频采样周期。

本文采用标准差(Standard Deviation)客观评价运动量计算误差,计算公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - d_i)^2} \quad (19)$$

式中 T_i 为测试位移, d_i 为根据编码器角度解算的位移真值, $i=1,2,\dots,N$ 。

实验采用动态成像方式,通过计算机控制精密转台匀速转动,记录编码器角度数据,用于计算目标图像位移真值。调整光学系统产生离焦效果,连续采集离焦模糊图像并使用本文方法进行目标图像配准,估计两幅图像之间的位移量。共

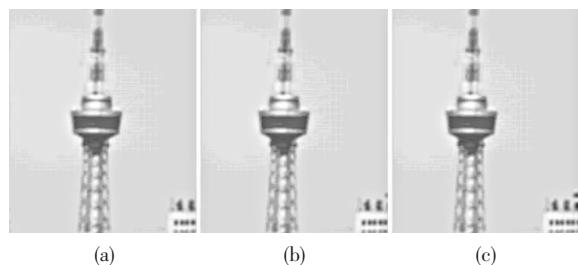


图5 序列图像。(a)第1帧,(b)第2帧,(c)第3帧。

Fig. 5 Sequence of image. (a) 1st frame, (b) 2nd frame and (c) 3rd frame.

参 考 文 献:

- [1] Castleman K R. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [2] 李英,李静宇,徐正平. 结合 SURF 与聚类分析方法实现运动目标的快速跟踪 [J]. 液晶与显示,2011,26(4): 544-550
- [3] 刘翔,周桢. 基于分块背景建模的运动目标检测技术 [J]. 液晶与显示,2011,26(6):831-835.
- [4] Ko Sung-Jea, Lee Sung-Hee, Jeon Seung-Won, *et al.* Fast digital image stabilization based on gray-coded bit-plane

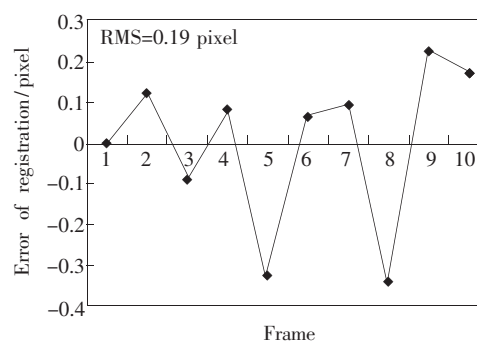


图6 配准误差曲线

Fig. 6 Curves of error

计采集 10 帧图像,采集的序列图像见图 5,检测误差曲线见图 6。

从实验结果可以看出,采用本文方法,最大配准误差 0.339,标准差 0.19,配准精度优于 $1/5$ 像元。

5 结 论

相位相关图像配准技术目前仍处于进一步发展和完善阶段,随着系统分析方法和基础理论的日趋成熟,相位相关技术在应用研究方面有着更加广阔的应用前景。本文通过分析成像系统离焦模糊的特点,根据相位相关配准原理,结合线性不变空间退化模型,讨论了离焦退化图像对图像配准结果的影响,证明了位移图像之间归一化的互功率谱具有离焦模糊不变性,为相位相关算法应用于离焦模糊图像的运动参数估计提供了理论依据,同时也进一步拓展了相位相关配准技术的适用范围,为光学成像系统离焦模糊图像的运动参数估计提供了新思路和有效的技术途径。理论分析和实验结果表明,相位相关算法用于检测离焦模糊图像运动参数合理有效。相位相关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 $1/5$ 像元级的配准精度,能有效提高目标运动的检测精度。

