

· 图像与信息处理 ·

## 基于点不变特征的亚像素级图像配准技术

傅德友, 赵秀影, 梁 心, 商玉凤, 董艳芹

(空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 图像匹配是图像处理和计算机视觉领域的一个基础问题, 它源自多个方面的实际问题. 点特征匹配的首要任务就是提取稳定的特征, 并进行描述. 该特征能对旋转、尺度缩放、仿射变换、视角变化、光照变化等图像变化因素保持一定的不变性, 而对物体运动、遮挡、噪声等因素也保持较好的可匹配性. 提出一种基于点的尺度、旋转不变特征变换(SIFT)算法的亚像素级图像配准算法, 首先在尺度空间进行特征检测, 并确定关键点的位置和关键点所处的尺度, 然后使用关键点邻域梯度的主方向作为该点的方向特征, 以实现算子对尺度和方向的无关性. 该方法具有旋转、尺度缩放、亮度变化不变性, 对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定. 独特性好, 信息量丰富, 适用于在海量特征数据库中进行快速、准确的匹配. 高速性, 该匹配算法可以达到实时的要求.

**关键词:** SIFT; 图像配准; 亚像素; 高分辨

**中图分类号:** TP751.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)03-0072-03

## Image Matching Technology to Sub-pixel Level Based on Point Unchanged Feature

FU De-you, ZHAO Xiu-ying, LIANG Xin, SHANG Yu-feng, DONG Yan-qin

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Image matching is a basis in the image processing and computer vision field, it comes from a number of practical problems. The primary task of Point feature matching is to extract the stability features, and to describe them. These features can maintain certain invariance to the image changes factors, such as rotation, zoom scale, affine transformations, and perspective changes, light changes etc., to the object movement, occlusion, noise and other factors can also maintain good matching. A point-based scale and rotation invariant feature transform algorithm for the sub-pixel image registration is proposed. First of all the feature detection and identification are made in the scale space, the position and scale of key points are determined, and then use main direction of the neighborhood's gradient as the direction of the key point in order to achieve the independence of the operator of the scale and direction. The method is invariance to rotation, scale scaling and brightness changes, else maintaining a certain degree of stability to changes of perspective, affine transformation and noise. It is unique, informative and suitable for fast and accurate matching in the mass characteristics database. Being high-speed, the matching algorithm can achieve real-time requirements.

**Key words:** SIFT; image matching; sub-pixel; high resolution

图像匹配是计算机中许多问题的基础问题. 点特征匹配的首要任务就是提取具有稳定特征的点, 并进行描述, 通过对特征描述符(不变量)的聚类, 从而达到点的匹配.

**收稿日期:** 2010-03-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(10871203)

**作者简介:** 傅德友(1957-), 男, 吉林长春人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为数字信号处理.

这里稳定一词的含义指的是希望该特征能对旋转、尺度缩放、仿射变换、视角变化、光照变化等图像变化因素保持一定的不变性,而对物体运动、遮挡、噪声等因素也保持较好的可匹配性,从而可以实现差异较大的2幅图像之间特征的匹配.对图像变化保持稳定的特征描述符称为不变量,比如对图像的旋转保持稳定的不变量称为旋转不变量(Rotation Invariant),对尺度缩放保持稳定的不变量则称为尺度不变量(Scale Invariant).特征描述符(Feature Descriptors)指的是检测图像的局部特征(比如边缘、角点、轮廓等),然后根据匹配目标的需要进行特征的组合、变换,以形成易于匹配、稳定性好的特征向量,从而把图像匹配问题转化为特征的匹配问题,进而将特征的匹配问题转化为特征空间特征向量的聚类问题.

应用一系列兴趣点进行图像匹配源于1981年Moravec对角点的应用.该方法由Harris and Stephens(1988)进一步发展.Zhang et al.(1995)证明出在每一个角点处用一个相关窗可以在很大范围内的图像中找到好的匹配.Schmid and Mohr(1997)应用不变特征来进行匹配,他们先用角点来寻找兴趣点,不是用相关窗来进行匹配,而是用一种邻域内的旋转不变描述子来进行匹配.Harris角点对图像的尺度变化特别敏感.Marsic and Dickinson(1999)用小波系数得到具有显著性的特征描述子.最近,主要工作寻找仿射不变特征描述子.(Baumberg, 2000; Tuytelaars and Van Gool, 2000; Mikolajczyk and Schmid, 2002; Schaffalitzky and Zisserman, 2002; Brown and Lowe, 2002).然而,没有一个是完全的仿射不变的,仿射框架跟旋转不变特征相比对噪声也更敏感,实际上,仿射不变特征只有仿射角度大于 $40^\circ$ 是才会显示出它的优势.

因此,寻找尺度不变量,具有更强的实用性.从寻找尺度不变量出发,并对过滤过的特征点进行精确的定位,达到亚像素级的图像配准.

## 1 图像多尺度表示

尺度空间理论最早出现于计算机视觉领域时其目的是模拟图像数据的多尺度特征.Koendetink证明高斯卷积核是实现尺度变换的唯一变换核,而Lindeberg等人则进一步证明高斯核是唯一的线性核.用高斯函数与二维图像做卷积,来模拟图像的尺

度变化.

所用的二维高斯函数定义如下

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

其中, $\sigma$ 代表了高斯正态分布的方差.

一幅二维图像,在不同尺度下的尺度空间表示可由图像与高斯核卷积得到

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2)$$

式中, $I(x, y)$ 代表图像的像素位置 $(x, y)$ 处的灰度; $\sigma$ 称为尺度空间因子,其值越小则表征该图像被平滑的越少,相应的尺度也就越小.大尺度对应于图像的概貌特征,小尺度对应于图像的细节特征. $L$ 代表了图像的尺度空间.

## 2 特征点检测

特征点一般是灰度变化的局部极值点,含有显著的结构信息,甚至这些点也可以没有实际的直观视觉意义,但在某种角度、某个尺度上含有丰富的易于匹配的信息.Mikolajczyk发现 $\sigma^2 \nabla^2 G$ 的极值相对于其他图像特征具有更好的独特性和稳定性.为了便于 $\sigma^2 \nabla^2 G$ 的实际计算,由热传导方程

$$\frac{\partial G}{\partial \sigma} = \sigma \nabla^2 G(x, y, \sigma) \quad (3)$$

又由

$$\sigma \nabla^2 G(x, y, \sigma) = \frac{\partial G}{\partial \sigma} \approx \frac{G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)}{k\sigma - \sigma} \quad (4)$$

推出

$$\sigma^2 \nabla^2 G(x, y, \sigma) \approx \frac{G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)}{k-1} \quad (5)$$

系数 $k-1$ 并不影响 $\sigma^2 \nabla^2 G$ 的极值的位置, $\sigma^2 \nabla^2 G(x, y, \sigma)$ 的极值点与 $G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)$ 相同.因此,在图像二维空间和DoG(Difference-of-Gaussian)尺度空间中同时检测局部极值点以作为特征点.DoG算子定义为2个不同尺度的高斯核的差分,其具有便于计算的特点,是归一化LoG(Laplacian-of-Gaussian)算子的近似.DoG算子如式(6)所示

$$D(x, y, \sigma) = [(G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma))] * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (6)$$

对于图像上的点,计算其在每一尺度下DoG算

子的响应值,这些值连起来得到特征尺度轨迹曲线.特征尺度曲线的局部极值点即为该特征的尺度.尺度轨迹曲线上完全可能存在多个局部极值点,这时可认为该点有多个特征尺度.

### 3 特征点的亚像素级定位

在检测尺度空间极值时,图 1 中标记为叉号的像素需要跟包括同一尺度的周围邻域 8 个像素和相邻尺度对应位置的周围邻域  $9 \times 2$  个像素总共 26 个像素进行比较,以确保在尺度空间和二维图像空间

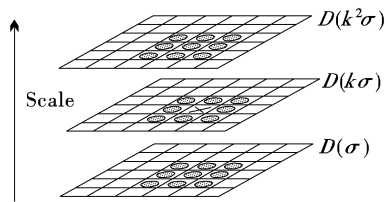


图 1 极值点检测示意图

都检测到局部极值。

为计算简单,实验中取  $K = 1.5$ ,尺度变化步长为 1.5。

如图 2 所示初步确定极值点的位置(黑色点)后,它们和真正的极值点(红色点)之间还是有距离,通过拟和二次函数式(7),通过对式(7)的求解可得出关键点的精确位置,进而精确确定关键点的位置和尺度,从而达到亚像素级的图像配准。

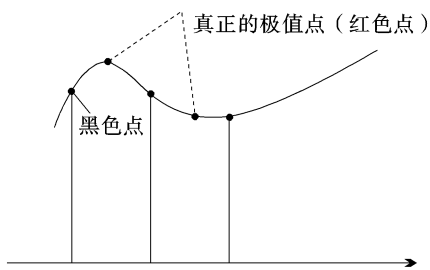


图 2 极值点位置示意图

$$D(\vec{x}) = D + \frac{\partial D^T}{\partial x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 D^T}{\partial x^2} x \quad (7)$$

$$\hat{x} = - \frac{\partial^2 D^{-1} \partial D}{\partial x^2 \partial x} \quad (8)$$

因为 DoG 算子会产生较强的边缘响应,同时去除低对比度(对比度  $< 5$ )的关键点和不稳定的边缘响应点(极值点之间最小距离  $< 0.04$ ),以增强匹配稳定性、提高抗噪声能力。

### 4 试验结果分析

特征点提取如图 3 所示,左边为原始图像,右边为提取特征点的图像.其中绿色“+”号为尺度极值点,外有蓝色框的为边缘极值点,外有绿色框的为真正的特征点.框面积大小表示尺度大小。

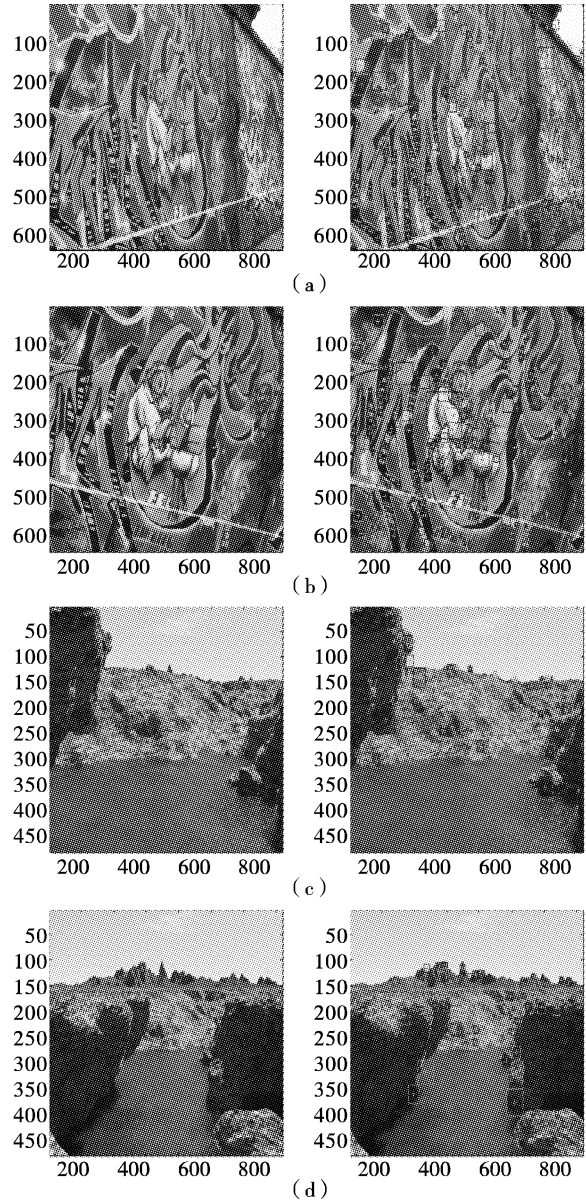


图 3 特征点的提取对比图

独特性(Distinctiveness)好,信息量丰富,适用于在海量特征数据库中进行快速、准确的匹配.多量性,即使少数的几个物体也可以产生大量 SIFT 特征向量.高速性,经优化的 SIFT 匹配算法甚至可以达到实时的要求.可扩展性,可以很方便地与其他形 (下转第 80 页)

### 3.2 误差分析

在测量过程中,平心光管反射镜的面型误差、平行光管的安装误差和瞄准误差等都会对测量结果带来影响.在此,仅针对平行光管系统由于轴向离焦引起的误差和红外探测系统与经纬仪回转轴相对位置所引起的误差进行讨论.

平行光管模拟的是无穷远点的物体发光.理想状态下,即使2个平行光管主光轴不重合,但只要二者平行,此时2个虚拟远场物点的主光轴角度偏差仍然约等于 $180^\circ$ .因为,尽管二者存在垂轴偏移量,但由于其大小相对无穷远来说可以忽略不计,所以,角度偏差不变.

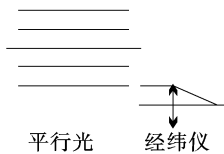


图4 偏差引起原因示意图

当平行光管系统的点源存在一定轴向离焦时,该平行光管模拟的则是有限距离远的物点发光.假设平行光管的点源热靶存在 $A$  m的轴向离焦时,根据透镜成像公式

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R} \quad (4)$$

$$n' = -n \quad (5)$$

$$R = 2f' \quad (6)$$

可知,  $\frac{1}{f' + A} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$ , 推导得

$$l = \left( \frac{1}{f'} - \frac{1}{f' + A} \right)^{-1} \quad (7)$$

即虚拟物点在  $\left( \frac{1}{f'} - \frac{1}{f' + A} \right)^{-1}$  处.

假设红外探测系统主光轴与“单个”平行光管主光轴在垂轴方向偏离 $B$  m.此时,相当于设备不动,远方虚拟物点沿垂轴方向偏离了 $B$  m.

$$\theta_{\text{角度偏差}} = B \times \left| \frac{1}{f'} - \frac{1}{f' + A} \right| \text{ rad} \quad (8)$$

由此可见,减小系统间主光轴垂轴方向的偏差和减小点源热靶相对于平行光管的轴向离焦量或者增大平行光管的焦距都有助于减少测量误差.

## 4 结 论

在已知平行光管轴向离焦大小的情况下,根据式(7)可直接推导出该平行光管所模拟的是多远距离的虚拟物点发光.并且可以根据式(1)、式(2)、式(3)、式(8)可计算出由于平行光管的离焦和系统主光轴间相应位置关系所引起的偏差.

值得注意的是,一般情况下平行光管离焦量的装调精度是比较高的.可是在红外探测系统测量时,检测系统是由点源(有时是用黑体与靶标相配合组成)和平行光管所组成的,点源的大小、摆放位置以及离焦量的控制都容易产生偏差.所以,对于精度要求较高的设备,应尽量采取上述方法或者其他能够减小误差的方法进行测量.当然,对于精度要求不高的设备,则可去除升降台和瞄准机构,从而简化整个测量过程.

### 参考文献

- [1] 梅遂生,王戎瑞.光电子技术[M].北京:国防工业出版社,2008:150-157.
- [2] 王之江,顾培森.实用光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,2006:151.
- [3] A R 杰哈.红外技术应用[M].北京:化学工业出版社,2004:130-140.
- [4] 肖泽新,安连生.工程光学设计[M].北京:电子工业出版社,2003:18-20.
- [5] 杨志文.光学测量[M].北京:北京理工大学出版社,1995:339-344,392-394.
- [6] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,1999:8-10.

(上接第74页)

式的特征向量进行联合.

### 参考文献

- [1] David G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision,2004.,60(2):91-110.

- [2] David G Lowe. Three-Dimensional Object Recognition from Single Two-Dimensional Images[J]. Artificial Intelligence, 1987,31(3): 355-395.
- [3] 徐小明,杨丹,张小洪,等.基于局部不变映射的特征描述器算法[J].自动化学报,2008,34(9):1174-1177.
- [4] Hadi Moradi . SIFT-ing Through Features with VIPR [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine,2006,9:72-77.